

DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES INDUCIDOS POR INFILTRACIÓN



Por:
JOHN OCTAVIO ORDUZ GÓMEZ
Código: 2300368

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA.
BOGOTÁ D.C.
2012

DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES INDUCIDOS POR INFILTRACIÓN



Por:
JOHN OCTAVIO ORDUZ GÓMEZ
Código: 2300368

**Trabajo Final de Maestría presentado como requisito parcial para optar al título
de Magíster en Ingeniería – Geotecnia.**

Director:
I.C., M.Sc., Ph.D. DIC. Carlos Eduardo Rodríguez Pineda.
Profesor del Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA.
BOGOTÁ D.C.
2012

Dedicado a:
Ana Lucía
Diana Fernanda

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Carlos Eduardo Rodríguez Pineda, quien orientó este Trabajo Final de Maestría, aportando su conocimiento y enseñanzas a lo largo del proyecto, puesto que por medio de ellas fue posible organizar y plasmar las ideas que forman el eje principal del presente trabajo.

De igual manera, quiero expresar mi agradecimiento a los profesores de la Maestría en Ingeniería – Geotecnia, puesto que los cursos de los cuales formé parte durante el Postgrado, enriquecieron ampliamente el conocimiento sobre el área. Los profesores son los siguientes:

Ingeniero Guillermo Eduardo Ávila
Ingeniero Félix Hernández Rodríguez
Ingeniera Carol Andrea Murillo
Ingeniero Álvaro Jaime González
Ingeniero Mario Camilo Torres
Ingeniero Octavio Coronado
Ingeniero Guillermo Ángel
Ingeniero Edgar Rodríguez

Así mismo, quiero agradecer de forma especial a los Ingenieros Félix Hernández Rodríguez y Mario Camilo Torres por sus recomendaciones y observaciones realizadas en su calidad de Jurados de este trabajo.

Agradezco también a mis compañeros de estudio, con quienes compartí gran parte del tiempo del Postgrado y quienes me impulsaron a continuar mis estudios.

Finalmente agradezco a mi familia en Bogotá y Sogamoso, quienes aportaron su paciencia y apoyo para llevar a cabo este trabajo.

RESUMEN

La infiltración al igual que los umbrales de lluvia son esenciales para la modelación de la respuesta hídrica del suelo. El presente estudio modela la textura y ubicación respecto de la superficie junto con la forma del suelo en 2-D y 3-D, el modelo de talud infinito y equilibrio límite. Se muestra que la respuesta hídrica y la estabilidad dependen no solo de los umbrales de lluvia, sino del tipo de suelo. El aporte de la succión es determinante en la respuesta hídrica y en la estabilidad del suelo.

Palabras clave:

Deslizamiento superficial
Infiltración
Lluvias
Taludes

ABSTRACT

Infiltration as rain thresholds are essential for modeling the response of the soil water. This study models the texture and location on the surface along with the shape of the ground in 2-D and 3-D, infinite slope and limit equilibrium models. It is shown that the water response and stability depend not only on rain thresholds, but the soil type. Contribution of suction is determinant on the water response and slope stability.

Keywords:

Shallow landslide
Infiltration
Rain
Slopes

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	v
LISTA DE FIGURAS.....	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA EN ESTUDIO	1
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	2
1.4 CONTENIDO DEL ESTUDIO	2
2. CONCEPTOS TEÓRICOS.....	4
2.1 GENERALIDADES	4
2.2 INFILTRACIÓN	5
2.2.1 ECUACIONES DE INFILTRACIÓN	5
2.2.1.1 Ecuación de Richards	5
2.2.1.2 Ecuación de Horton	7
2.2.1.3 Ecuación de Philip.....	8
2.2.1.4 Ecuación de Iverson	8
2.2.2 OTRAS ECUACIONES DE INFILTRACIÓN.....	10
2.2.2.1 Ecuación de Green - Ampt.....	10
2.2.2.2 Ecuación de Kostiaikov	11
2.2.2.3 Ecuación de Holtan.....	12
2.2.2.4 Ecuación de Lumb	13
2.2.3 CONSIDERACIONES RESPECTO DE LA INFILTRACIÓN.....	13
2.2.4 EJERCICIO DE APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE INFILTRACIÓN	15
2.2.5 SÍNTESIS DE LAS ECUACIONES DE INFILTRACIÓN	23
2.3 ALGUNAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS	31
2.3.1 CURVA CARACTERÍSTICA SUELO-AGUA (SWCC)	31
2.3.1.1 Contenido volumétrico de agua (θ)	32
2.3.1.2 Ecuación de Van Genuchten	33
2.3.1.3 Ecuación de Fredlund y Xing	33
2.3.1.4 Comparación de la SWCC a partir de las ecuaciones de Van Genuchten y Fredlund y Xing.....	33
2.3.2 COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	36
2.3.3 RESISTENCIA AL CORTE.....	37
2.3.3.1 Ecuación de Bishop.....	38
2.3.3.2 Ecuación de Fredlund.....	39
2.3.3.3 Ecuación de Vanapalli	39
2.3.3.4 Ecuación de Miao L., Lui S., y Lai Y.....	40
2.3.3.5 Ecuación de Tekinsoy M.A., Kayadelen C., Keskin M.S. y Söylemez M.	40
2.3.3.6 Otras ecuaciones	41

2.3.3.7	Comentarios respecto de las ecuaciones de resistencia al corte en suelos parcialmente saturados.....	41
2.4	EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD DE TALUDES	41
2.4.1	ESTUDIO DE FREEZE (1969).....	41
2.4.2	ESTUDIO DE PRADEL Y RAAD (1993).....	42
2.4.3	ESTUDIO DE ANDERSON Y SITAR (1995).....	43
2.4.4	ESTUDIO DE NG Y SHI (1998)	43
2.4.5	ESTUDIO DE GASMO, RAHARDJO Y LEONG (2000)	44
2.4.6	ESTUDIO DE CHO Y LEE (2002).....	45
2.4.7	ESTUDIO DE KIM J., JEONG S., PARK S. Y SHARMA J. (2004).....	45
2.4.8	ESTUDIO DE CHO (2009)	46
2.4.9	ESTUDIO DE LEE L., GOFAR N., RAHARDJO H. (2009)	46
2.4.10	ESTUDIO DE LADE (2010)	47
3.	MODELACIÓN DE LA RESPUESTA HÍDRICA	48
3.1	UMBRALES DE LLUVIA PARA EL INICIO DE DESLIZAMIENTOS	48
3.2	MODELACIÓN EN 2-D	50
3.2.1	MODELACIÓN EN 2-D CON 1 TEXTURA DE SUELO	50
3.2.2	MODELACIÓN EN 2-D CON VARIAS TEXTURAS DE SUELO	55
3.2.3	MODELACIÓN EN 2-D USANDO LOS UMBRALES DE LLUVIA.....	58
3.2.3.1	Modelación en 2-D usando los umbrales de lluvia de Guzzetti.....	58
3.2.3.2	Modelación en 2-D con umbrales de lluvia evento – lluvia acumulada .	63
3.3	MODELACIÓN EN 3-D	69
3.3.1	MODELACIONES EN 2-D DE LAS 3 FORMAS EN PERFIL	71
3.3.2	MODELACIONES EN 3-D DE LAS 9 FORMAS BÁSICAS DE PARSONS	72
4.	INFLUENCIA DE LA RESPUESTA HÍDRICA EN LA ESTABILIDAD	75
4.1	MODELACIÓN CON TALUD INFINITO.....	75
4.2	RESULTADOS DE LA INFILTRACIÓN MODELADA EN 3-D EVALUANDO EL FACTOR DE SEGURIDAD	82
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
5.1	CONCLUSIONES.....	89
5.2	RECOMENDACIONES.....	91
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
	APÉNDICE	97

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estimación del parámetro α (Frere et al., 1975). (Adoptado de AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1994).....	12
Tabla 2. Estimación de la tasa final de infiltración v_{fin} (Musgrave, 1955). (Adoptado de AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1994).....	13
Tabla 3. Grupo hidrológico del suelo. (Adoptado de Mitchell, R.J. Appendix A. Hydrologic Soil Groups).....	13
Tabla 4. Parámetros para el sitio de Upper Marlboro. (Adoptado de Turner, 2006).....	15
Tabla 5. Valores promedio de Upper Marlboro. (Adaptado de Turner, 2006).....	16
Tabla 6. Tasa de infiltración observada en campo (Upper Marlboro). (Adaptado de Turner, 2006).....	16
Tabla 7. Parámetros ponderados, ecuación de Richards.....	17
Tabla 8. Cálculo de v_i y z_w con la ecuación de Richards.....	18
Tabla 9. Cálculo de los parámetros de Horton (Upper Marlboro).....	18
Tabla 10. Cálculo de v_i y z_w con la ecuación de Horton.....	19
Tabla 11. Cálculo de la sortividad S para cada capa.....	19
Tabla 12. Cálculo de v_i y z_w para la ecuación de Philip.....	20
Tabla 13. Cálculo de z_w , t y v_i para la ecuación de Green - Ampt.....	20
Tabla 14. Tabulación de los valores de z_w , t y v_i para la ecuación de Green - Ampt.....	21
Tabla 15. Cálculo de los parámetros de Kostiaikov (Upper Marlboro).....	21
Tabla 16. Cálculo de v_i y z_w con la ecuación de Kostiaikov.....	22
Tabla 17. Cálculo de v_i y z_w con la ecuación de Holtan.....	22
Tabla 18. Cálculo de L_f con la ecuación de Lumb.....	23
Tabla 19. Síntesis del cálculo de v_i y z_w con 6 ecuaciones de infiltración.....	24
Tabla 20. Valores de L_f , suelo de Upper Marlboro.....	25
Tabla 21. Parámetros ponderados, ecuación de Richards.....	27
Tabla 22. Parámetros hidráulicos de 12 texturas de suelos para trabajar con Van Genuchten (1980) (Adoptado de Šimůnek, 2007).....	34
Tabla 23. Parámetros hidráulicos para la construcción de SWCC.....	34
Tabla 24. Diferentes patrones de la fase de aire en suelos parcialmente saturados (Adaptado de Chenggang, 2006).....	35
Tabla 25. Umbrales de intensidad-duración de lluvia para el inicio de deslizamientos (Adoptado de Guzzetti, 2005).....	49
Tabla 26. Umbrales de lluvia detonante (Adaptado de Mayorga, 2003).....	50
Tabla 27. Resultados de las modelaciones relacionando θ_i con el tiempo t , para el suelo de textura Franco limoso, según los datos de la Tabla 22.....	54
Tabla 28. Cabezas de presión ψ resultantes de algunas modelaciones, involucrando 3 texturas de suelo.....	56

Tabla 29. <i>Combinaciones de datos para las 153 simulaciones usando los umbrales de Guzzetti ...</i>	58
Tabla 30. <i>Valores de lluvia propuestos para modelar Llev - Llac.....</i>	63
Tabla 31. <i>Parámetros hidráulicos y de resistencia para modelar la estabilidad.....</i>	75
Tabla 32. <i>Duración de tiempo para las dos combinaciones de Llev - Llac</i>	82
Tabla 33. <i>Duración de tiempo para otras dos combinaciones de Llev - Llac</i>	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Definición del sistema coordenado local usado para analizar la ecuación de Richards, letras minúsculas (Adaptado de Iverson, 2000).....	9
Figura 2. Representación del modelo de Green – Ampt (Adaptado de AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, Hydrology Handbook, 1994).	11
Figura 3. Diagrama de cuerpo libre de un talud infinito (Adaptado de Collins y Znidarcic, 2004)..	14
Figura 4. Curva de tasa de infiltración v_i – tiempo t ; datos observados en campo para el suelo de Upper Marlboro. (Adaptado de Turner, 2006).....	17
Figura 5. Curvas de infiltración calculadas con la ecuación de Richards para el suelo de Upper Marlboro. (Izquierda) Tasa de infiltración, (Derecha) Infiltración acumulada.....	18
Figura 6. Curva $\ln(v_i - v_c)$ – tiempo t , ecuación de Horton.....	18
Figura 7. Curvas de infiltración calculadas con la ecuación de Horton para el suelo de Upper Marlboro. (Izquierda) Tasa de infiltración, (Derecha) Infiltración acumulada.....	19
Figura 8. Curvas de infiltración calculadas con la ecuación de Philip para el suelo de Upper Marlboro. (Izquierda) Tasa de infiltración, (Derecha) Infiltración acumulada.....	20
Figura 9. Curvas de infiltración calculadas con la ecuación de Green - Ampt para el suelo de Upper Marlboro. (Izquierda) Tasa de infiltración, (Derecha) Infiltración acumulada.....	21
Figura 10. Curva $\log(v_i) - \log(t)$, ecuación de Kostiaikov.....	21
Figura 11. Curvas de infiltración calculadas con la ecuación de Kostiaikov para el suelo de Upper Marlboro. (Izquierda) Tasa de infiltración, (Derecha) Infiltración acumulada.....	22
Figura 12. Curvas de infiltración calculadas con la ecuación de Holtan para el suelo de Upper Marlboro. (Izquierda) Tasa de infiltración, (Derecha) Infiltración acumulada.....	23
Figura 13. Curva de profundidad del frente húmedo calculada con la ecuación de Lumb, para el suelo de Upper Marlboro.	23
Figura 14. Curvas de tasa de infiltración v_i , calculadas con 6 ecuaciones para el suelo de Upper Marlboro.	24
Figura 15. Curvas de infiltración acumulada z_w , calculadas con 6 ecuaciones para el suelo de Upper Marlboro.	25
Figura 16. Curvas de infiltración acumulada z_w , vs tasa de infiltración v_i , calculadas con 6 ecuaciones para el suelo de Upper Marlboro.....	25
Figura 17. Curvas L_f - tiempo, para el suelo de Upper Marlboro.....	26
Figura 18. (Izquierda superior) variación de θ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (derecha superior) variación de ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (izquierda inferior) variación de z con θ a diferentes tiempos t , (derecha inferior) variación de z con ψ a diferentes tiempos t , modelación realizada con los datos de la Tabla 7, para el suelo de Upper Marlboro.....	26
Figura 19. (Izquierda superior) variación de θ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (derecha superior) variación de ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (izquierda inferior)	

<i>variación de z con θ a diferentes tiempos t, (derecha inferior) variación de z con ψ a diferentes tiempos t, modelación realizada con los datos de la Tabla 21, para el suelo de Upper Marlboro.</i>	<i>27</i>
Figura 20. (Izquierda superior) variación de θ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (derecha superior) variación de ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (izquierda inferior) variación de z con θ a diferentes tiempos t , (derecha inferior) variación de z con ψ a diferentes tiempos t , modelación realizada con los datos de la Tabla 5, para el suelo de Upper Marlboro.....	<i>28</i>
Figura 21. Curva característica suelo-agua (SWCC) para un suelo de textura Franco limoso.....	<i>32</i>
Figura 22. Triángulo de Suelos de la USDA (EE UU) (Adaptado de Šimůnek, 2007 y USDA, 2007)	<i>34</i>
Figura 23. Curva característica suelo-agua (SWCC) para un suelo de textura Franco arcilloso, según los parámetros de la Tabla 23, comparando las curvas halladas con las expresiones de Van Genuchten (1980) y Fredlund y Xing (1994).....	<i>35</i>
Figura 24. Curva característica suelo-agua (SWCC) para un suelo de textura Franco limoso (Izquierda) y Arena francoso (derecha) según los parámetros de la Tabla 23.....	<i>36</i>
Figura 25. Curva succión matricial – K , para un suelo de textura Franco arcilloso, complementando la Figura 23, calculada con la ecuación de Van Genuchten (1980).....	<i>37</i>
Figura 26. Curva succión matricial – K , para un suelo de textura Franco limoso (Izquierda) y Arena francoso (derecha) calculada con la ecuación de Van Genuchten (1980).	<i>37</i>
Figura 27. Envolvente de falla extendida de Mohr-Colulomb para suelos parcialmente saturados (Adaptado de Fredlund y Rahardjo, 1993).....	<i>39</i>
Figura 28. Efecto del tipo de suelo, para tres texturas de suelo (Tomado de Freeze, 1969).....	<i>42</i>
Figura 29. Esquema de la reducción de esfuerzos debido a la respuesta hídrica del suelo (Tomado de Andereson y Sitar, 1995).	<i>43</i>
Figura 30. Factor de Seguridad vs duración de la lluvia para un talud de referencia. (Línea superior) lluvia normal, (Línea inferior) lluvia intensa de corta duración. También se muestra Δf respecto del Factor de Seguridad en condiciones secas (línea discontinua) (Tomado de Ng y Shi, 1998).	<i>44</i>
Figura 31. Factores de Seguridad a lo largo de julio y agosto de 1996 para el caso particular estudiado por Gasmó, Rahardjo Y Leong (Tomado de Gasmó et al., 2000).	<i>44</i>
Figura 32. Comparación de Factores de Seguridad en la estabilidad modelando con software (Seep/W para infiltración y Slope/W para estabilidad), infiltración con el método de Pradel y Raad y finalmente la metodología de Mein y Larson (Tomado de Cho y Lee, 2002).	<i>45</i>
Figura 33. Relación entre el Factor de Seguridad y la succión en el frente húmedo para tres valores de ángulo de fricción y dos inclinaciones de talud (Tomado de Kim et al., 2004).....	<i>45</i>
Figura 34. Variación del Factor de Seguridad con la profundidad del frente húmedo para dos texturas de suelo con flujo parcialmente saturado y flujo paralelo (saturado) (Tomado de Cho, 2009).	<i>46</i>
Figura 35. Variación del Factor de Seguridad, hallado con la metodología PERISI y el modelo de Rahardjo (1995) para: (a) grava limosa, (b) arena limosa y (c) limo, para diferentes profundidades de la tabla de agua (Tomado de Lee et al., 2009).....	<i>47</i>
Figura 36. Comparación de la envolvente de falla de Mohr – Coulomb, con la envolvente real de falla para un suelo analizado (Tomado de Lade, 2010).....	<i>47</i>
Figura 37. (Izquierda) Comparación de los 4 primeros umbrales de la Tabla 25 para el inicio de deslizamientos. (derecha) Comparación de los umbrales según el clima: 5 clima tropical húmedo, 6	

<i>clima latitud media, 7 clima subtropical húmedo templado latitud media con humedad constante, 8 clima subtropical húmedo templado latitud media con estación seca en invierno, 9 clima de zona montañosa, 10 clima templado de latitud media (Adaptado de Guzzetti, 2005).</i>	49
Figura 38. Representación gráfica de los umbrales de lluvia detonante (Adaptado de Mayorga, 2005).	50
Figura 39. Ejemplo de ψ alcanzadas al final de la simulación para un suelo de textura clay loam (Franco arcilloso), con espesor de 4,0 m, luego de 141,6 horas de infiltración simuladas.	51
Figura 40. (Izquierda superior) variación de θ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (derecha superior) variación de ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (izquierda inferior) variación de z con θ a diferentes tiempos t , (derecha inferior) variación de z con ψ a diferentes tiempos t , para un suelo de textura silt loam (Franco limoso), con espesor de 4,0 m, luego de 150 horas de infiltración simuladas.	52
Figura 41. Valores promedio de cabezas de presión ψ para cada profundidad z medida desde superficie, para las 12 texturas de suelo de la Tabla 22. Gráfica de relación de $\psi - z$, para profundidades de 0,0 m a 5,0 m, según las simulaciones realizadas.	53
Figura 42. Curvas que relacionan θ_i (naranja) y $\Delta\theta$ (verde) con el tiempo de saturación t_s y el tiempo en que alcanza su máxima ψ ($t\psi_{m\acute{a}x}$), para el suelo con textura Franco limoso.	54
Figura 43. Combinaciones de posiciones de las 3 texturas y formas trabajadas en la simulación en 2-D para los 4 espesores de suelo.	55
Figura 44. Combinación 1 de texturas, forma curva inclinada con espesor de 4,0 m: (izquierda superior) variación de Ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (izquierda inferior) variación de la profundidad z con Ψ para diferentes tiempos t .	57
Figura 45. Variación de Ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z para suelo de textura Franco limoso (silty loam), con tres valores de $I - D$ y tres condiciones de θ_i .	59
Figura 46. Variación de Ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z para suelos de textura Arena francoso/Franco arcilloso (loamy sand/clay loam), con tres valores de $I - D$ y tres condiciones de θ_i .	60
Figura 47. Variación de Ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z para suelos de textura Franco arcilloso/Arena francoso (clay loam/loamy sand), con tres valores de $I - D$ y tres condiciones de θ_i .	61
Figura 48. Variación de Ψ en un suelo de textura Franco limoso (silty loam), modelación para 2 casos de Llev - Llac.	64
Figura 49. Variación de Ψ en un suelo de textura Arena francoso (loamy sand), modelación para 2 casos de Llev - Llac.	65
Figura 50. Variación de Ψ en un suelo de textura Franco arcilloso (clay loam), modelación para 2 casos de Llev - Llac.	66
Figura 51. Variación de Ψ en dos suelos de textura Arena francoso/Franco arcilloso (loamy sand/clay loam), modelación para 2 casos de Llev - Llac.	67
Figura 52. Variación de Ψ en dos suelos de textura Franco arcilloso/Arena francoso (clay loam/loamy sand), modelación para 2 casos de Llev - Llac.	68
Figura 53. Nueve formas básicas para unidades de laderas (Adaptado de Parsons, 1988).	70
Figura 54. Valores de ψ alcanzados luego de 90 días de Llac = 3,029 cm/d. Escalas para ψ en cm. (Izquierda) Franco limoso. (Derecha) Arena francoso.	71

Figura 55. Valores de cabezas de presión ψ alcanzados luego de 37 días de $L_{lac} = 0,925$ cm/d. Escalas para ψ en cm. (Izquierda) Franco limoso. (Derecha) Areno francoso.....	71
Figura 56. Valores de ψ alcanzados para $L_{lac} = 3,029$ cm/d (90 días 2-D + 3 días 3-D), con las Formas Básicas No. 2 (izquierda) y No. 6 (derecha), según Parsons (1988) (Figura 53). Suelo de textura Franco limoso. Escalas para ψ en cm.	72
Figura 57. Comparación de ψ alcanzados para $L_{lac} = 3,029$ cm/d. (Izquierda) 90 días 2-D + 3 días 3-D, Formas Básicas: No. 1, No. 4 y No. 7, según Parsons (1988) (Figura 53). (Derecha) 93 días 2-D, Forma en Perfil: Planar. Suelo de textura Franco limoso. Escalas para ψ en cm.	73
Figura 58. Comparación de ψ alcanzados en período de no lluvia, luego de $L_{lac} = 3,029$ cm/d. (Izquierda) 3-D, 93 días $L_{lac} + 1$ día no lluvia, Forma Básica: No. 2, según Parsons (1988) (Figura 53). (Derecha) 2-D, 93 días $L_{lac} + 1$ día no lluvia, Forma en Perfil: Convexo. Suelo de textura Franco limoso. Escalas para ψ en cm.	73
Figura 59. Falla en talud infinito para dos capas de suelo (Adaptado de Cho, 2009).....	75
Figura 60. Variación de FS con la profundidad z para diferentes tiempos t , en un suelo de textura Franco limoso (silty loam), evaluación con el modelo de talud infinito para 2 casos de $L_{lev} - L_{lac}$, con diferentes β . Corresponde con los valores de Ψ de la Figura 48.	77
Figura 61. Variación de FS con la profundidad z para diferentes tiempos t , en un suelo de textura Areno francoso (loamy sand), evaluación con el modelo de talud infinito para 2 casos de $L_{lev} - L_{lac}$, con diferentes β . Corresponde con los valores de Ψ de la Figura 49.	78
Figura 62. Variación de FS con la profundidad z para diferentes tiempos t , en un suelo de textura Franco arcilloso (clay loam), evaluación con el modelo de talud infinito para 2 casos de $L_{lev} - L_{lac}$, con diferentes β . Corresponde con los valores de Ψ de la Figura 50.	79
Figura 63. Variación de FS con la profundidad z para diferentes tiempos t , en dos suelos de textura Areno francoso/Franco arcilloso (loamy sand/clay loam), evaluación con el modelo de talud infinito para 2 casos de $L_{lev} - L_{lac}$, con diferentes β . Corresponde con los valores de Ψ de la Figura 51.	80
Figura 64. Variación de FS con la profundidad z para diferentes tiempos t , en dos suelos textura Franco arcilloso/Areno francoso (clay loam/loamy sand), evaluación con el modelo de talud infinito para 2 casos de $L_{lev} - L_{lac}$, con diferentes β . Corresponde con los valores de Ψ de la Figura 52... ..	81
Figura 65. Variación de FS con el tiempo t : $L_{lac} = 2817$ mm (3,029 cm/día – 93 días), $L_{lev} = 0,8$ mm (0,01 cm/h – 8 horas). Forma del talud en perfil: cóncavo . (Izquierda) Areno francoso, (derecha) Franco limoso.....	82
Figura 66. Variación de FS con el tiempo t : $L_{lac} = 2817$ mm (3,029 cm/día – 93 días), $L_{lev} = 0,8$ mm (0,01 cm/h – 8 horas). Forma del talud en perfil: convexo . (Izquierda) Areno francoso, (derecha) Franco limoso.....	83
Figura 67. Variación de FS con el tiempo t : $L_{lac} = 2817$ mm (3,029 cm/día – 93 días), $L_{lev} = 0,8$ mm (0,01 cm/h – 8 horas). Forma del talud en perfil: planar . (Izquierda) Areno francoso, (derecha) Franco limoso.....	83
Figura 68. Variación de FS con el tiempo t : $L_{lac} = 370$ mm (0,925 cm/día – 40 días), $L_{lev} = 150$ mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: cóncavo . (Izquierda) Areno francoso, (derecha) Franco limoso.....	83

Figura 69. Variación de FS con el tiempo t: Llac = 370 mm (0,925 cm/día – 40 días), Llev = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: convexo . (Izquierda) Areno francoso, (derecha) Franco limoso.....	84
Figura 70. Variación de FS con el tiempo t: Llac = 370 mm (0,925 cm/día – 40 días), Llev = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: planar . (Izquierda) Areno francoso, (derecha) Franco limoso.....	84
Figura 71. Variación de FS con el tiempo t: Llac = 1000 mm (3,333 cm/día – 30 días), Llev = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: cóncavo . (Izquierda) Areno francoso, (derecha) Franco limoso.....	85
Figura 72. Variación de FS con el tiempo t: Llac = 1000 mm (3,333 cm/día – 30 días), Llev = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: covexo . (Izquierda) Areno francoso, (derecha) Franco limoso.....	85
Figura 73. Variación de FS con el tiempo t: Llac = 1000 mm (3,333 cm/día – 30 días), Llev = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: planar . (Izquierda) Areno francoso, (derecha) Franco limoso.....	85
Figura 74. Variación de FS con el tiempo t: Llac = 100 mm (0,333 cm/día – 30 días), Llev = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: cóncavo . (Izquierda) Areno francoso, (derecha) Franco limoso.....	86
Figura 75. Variación de FS con el tiempo t: Llac = 100 mm (0,333 cm/día – 30 días), Llev = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: convexo . (Izquierda) Areno francoso, (derecha) Franco limoso.....	86
Figura 76. Variación de FS con el tiempo t: Llac = 100 mm (0,333 cm/día – 30 días), Llev = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: planar . (Izquierda) Areno francoso, (derecha) Franco limoso.....	86
Figura 77. FS obtenido luego de 45 días de Llac (3,029 cm/día) en suelo de textura Areno francoso. Forma del talud en perfil: convexo	87
Figura 78. FS obtenido luego de 93 días de Llac (3,029 cm/día) en suelo de textura Franco limoso. Forma del talud en perfil: planar	87
 Figura A 1. Variación del FS con el tiempo: Llac = 2817 mm (3,029 cm/día – 93 días), Llev = 0,8 mm (0,01 cm/h – 8 horas). Forma del talud en perfil: cóncavo. Textura: Franco limoso. Método de Bishop.....	97
Figura A 2. Variación del FS con el tiempo: Llac = 2817 mm (3,029 cm/día – 93 días), Llev = 0,8 mm (0,01 cm/h – 8 horas). Forma del talud en perfil: convexo . Textura: Franco limoso. Método de Bishop	98
Figura A 3. Variación del FS con el tiempo: Llac = 2817 mm (3,029 cm/día – 93 días), Llev = 0,8 mm (0,01 cm/h – 8 horas). Forma del talud en perfil: planar . Textura: Franco limoso. Método de Bishop	99
Figura A 4. Variación del FS con el tiempo: Llac = 2817 mm (3,029 cm/día – 93 días), Llev = 0,8 mm (0,01 cm/h – 8 horas). Forma del talud en perfil: cóncavo . Textura: Areno francoso. Método de Bishop	100
Figura A 5. Variación del FS con el tiempo: Llac = 2817 mm (3,029 cm/día – 93 días), Llev = 0,8 mm (0,01 cm/h – 8 horas). Forma del talud en perfil: convexo . Textura: Areno francoso. Método de Bishop	101

Figura A 6. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 2817 \text{ mm}$ ($3,029 \text{ cm/día} - 93 \text{ días}$), $L_{lev} = 0,8 \text{ mm}$ ($0,01 \text{ cm/h} - 8 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: planar . Textura: Areno francoso . Método de Bishop	102
Figura A 7. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 370 \text{ mm}$ ($0,925 \text{ cm/día} - 40 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: cóncavo . Textura: Franco limoso . Método de Bishop	103
Figura A 8. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 370 \text{ mm}$ ($0,925 \text{ cm/día} - 40 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: convexo . Textura: Franco limoso . Método de Bishop	104
Figura A 9. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 370 \text{ mm}$ ($0,925 \text{ cm/día} - 40 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: planar . Textura: Franco limoso . Método de Bishop	105
Figura A 10. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 370 \text{ mm}$ ($0,925 \text{ cm/día} - 40 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: cóncavo . Textura: Areno francoso . Método de Bishop	106
Figura A 11. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 370 \text{ mm}$ ($0,925 \text{ cm/día} - 40 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: convexo . Textura: Areno francoso . Método de Bishop	107
Figura A 12. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 370 \text{ mm}$ ($0,925 \text{ cm/día} - 40 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: planar . Textura: Areno francoso . Método de Bishop	108
Figura A 13. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 1000 \text{ mm}$ ($3,333 \text{ cm/día} - 30 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: cóncavo . Textura: Franco limoso . Método de Bishop	109
Figura A 14. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 1000 \text{ mm}$ ($3,333 \text{ cm/día} - 30 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: convexo . Textura: Franco limoso . Método de Bishop	110
Figura A 15. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 1000 \text{ mm}$ ($3,333 \text{ cm/día} - 30 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: planar . Textura: Franco limoso . Método de Bishop	111
Figura A 16. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 1000 \text{ mm}$ ($3,333 \text{ cm/día} - 30 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: cóncavo . Textura: Areno francoso . Método de Bishop	112
Figura A 17. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 1000 \text{ mm}$ ($3,333 \text{ cm/día} - 30 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: convexo . Textura: Areno francoso . Método de Bishop	113
Figura A 18. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 1000 \text{ mm}$ ($3,333 \text{ cm/día} - 30 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: planar . Textura: Areno francoso . Método de Bishop	114
Figura A 19. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 100 \text{ mm}$ ($0,333 \text{ cm/día} - 30 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: cóncavo . Textura: Franco limoso . Método de Bishop	115

Figura A 20. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 100 \text{ mm}$ ($0,333 \text{ cm/día} - 30 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: convexo . Textura: Franco limoso . Método de Bishop.....	116
Figura A 21. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 100 \text{ mm}$ ($0,333 \text{ cm/día} - 30 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: planar . Textura: Franco limoso . Método de Bishop.....	117
Figura A 22. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 100 \text{ mm}$ ($0,333 \text{ cm/día} - 30 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: cóncavo . Textura: Areno francoso . Método de Bishop.....	118
Figura A 23. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 100 \text{ mm}$ ($0,333 \text{ cm/día} - 30 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: convexo . Textura: Areno francoso . Método de Bishop.....	119
Figura A 24. Variación del FS con el tiempo: $L_{lac} = 100 \text{ mm}$ ($0,333 \text{ cm/día} - 30 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: planar . Textura: Areno francoso . Método de Bishop.....	120

INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos inducidos por la lluvia, se han incrementado en los últimos años por las fuertes temporadas invernales, afectando directamente a los habitantes de las zonas de cordillera y las actividades del país en general. Para realizar confiablemente el estudio y evaluación de los diversos parámetros hidráulicos y de resistencia del suelo, en los últimos años se ha desarrollado diferente software que permite obtener de forma inmediata la variación de dichos parámetros a través del tiempo y anticipar de forma aproximada el comportamiento mecánico y físico de los taludes cuando se someten a diferentes combinaciones de lluvias. Obviamente la utilización de software no reemplaza la práctica de ensayos de laboratorio o de campo, que entregan los datos reales del comportamiento y variación de parámetros de los suelos, más bien permiten evaluar diversos escenarios a la vez y generar diferentes alternativas que muestran como sería el comportamiento de los materiales si se sometieran a gran cantidad de condiciones y escenarios.

1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Objetivo general:

Evaluar la influencia del proceso de infiltración en la generación de deslizamientos superficiales.

Objetivos específicos:

- Documentar a partir de bibliografía y casos históricos, los procesos de inestabilidad de taludes inducidos por lluvias.
- Analizar la influencia de las lluvias en la respuesta hídrica del talud.
- Analizar la influencia del suelo en la respuesta hídrica del talud.
- Analizar la influencia de la respuesta hídrica en la estabilidad.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA EN ESTUDIO

Desde el punto de vista geológico, las zonas montañosas del país son relativamente jóvenes y muchos de sus materiales, en especial los suelos, están adaptándose al ambiente, y en ese proceso sufren cambios en sus propiedades alterando su resistencia; adicionalmente algunos agentes externos o detonantes, inducen pérdidas de resistencia al corte o a tracción en los materiales, y en consecuencia se rompe el equilibrio y se genera la falla.

Aunque se considera que las lluvias intensas constituyen un factor externo que altera el equilibrio de los taludes y laderas, se debe profundizar en su estudio e investigar cómo

cambian algunas propiedades del suelo disminuyendo la resistencia de los taludes cuando son infiltrados por lluvias. Varios estudios han aportado herramientas iniciales para elaborar sistemas de alerta o zonificaciones de amenaza que permiten salvaguardar vidas y propiedades, pero se deben definir mejor las causas de los deslizamientos y afinar dichos sistemas o zonificaciones.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

A nivel global, los deslizamientos constituyen un riesgo para vidas y propiedades, especialmente en regiones donde las laderas compuestas por suelos se someten a lluvias y aguaceros fuertes, que se presentan en determinadas épocas del año. En Colombia, normalmente se tienen dos temporadas de lluvia en el año, siendo mayo y noviembre los meses con mayor aporte en cuanto a pluviosidad; las temporadas invernales de los últimos dos años han acumulado grandes pérdidas económicas, pero sobre todo han evidenciado la influencia que la infiltración del agua lluvia tiene en los deslizamientos.

En Colombia, en las zonas de cordillera donde se ubican la mayoría de las poblaciones y actividades económicas, es común que junto con las fuertes lluvias se presenten deslizamientos superficiales que ocasionan pérdidas de vidas y de propiedades, además de otros movimientos en masa. El estudio del proceso de infiltración de las lluvias torrenciales, junto con el análisis de la respuesta del terreno, contribuyen con la prevención de los movimientos en masa, puesto que permiten comprender mejor el proceso que los origina, cuales propiedades mecánicas y físicas cambian, y posteriormente establecer parámetros que alimenten sistemas de alerta y permitan construir zonificaciones de riesgo locales y generales.

Varios autores que modelan la infiltración de agua dentro del suelo, profundidades críticas para la ocurrencia de deslizamientos, cambios de presiones de poros o succión y otras condiciones que influyen en la respuesta hídrica del suelo para evaluar su estabilidad, han mostrado diferentes maneras de predecir los cambios de resistencia en los suelos influenciados por pequeñas variaciones de propiedades dentro del mismo, que avanzando a través del tiempo muestran de forma muy cercana la evolución del comportamiento de estos materiales cuando se quiere evaluar la estabilidad de taludes y laderas.

El estudio de los suelos parcialmente saturados, que en los últimos años se ha realizado exhaustivamente en todo el mundo, ha entregado otras formas y herramientas para evaluar su comportamiento cuando avanza el frente húmedo dentro de los mismos. Cada autor ha propuesto expresiones matemáticas, que por sus limitaciones y bondades, aproximan el valor de resistencia al corte de los suelos cuando en estos varían las presiones de poros, el contenido de agua y su conductividad hidráulica.

1.4 CONTENIDO DEL ESTUDIO

El estudio ha sido organizado de la siguiente forma:

- El segundo capítulo aborda conceptos teóricos sobre infiltración de suelos y se realiza un ejercicio de aplicación para comparar las ecuaciones de infiltración; así mismo se presentan algunas propiedades de los suelos parcialmente saturados y de resistencia al corte, finalizando con la síntesis de algunos trabajos relacionados con el presente estudio.
- El tercer capítulo contiene la modelación de la respuesta hídrica del suelo frente a diferentes condiciones de infiltración. Se evalúan algunos umbrales de lluvia – deslizamiento publicados dentro y fuera del país, variando diferentes condiciones para modelaciones de infiltración en 2-D y 3-D; también se modela la respuesta hídrica del suelo sometido a infiltración continua.
- El cuarto capítulo describe la influencia de la respuesta hídrica en la estabilidad, partiendo de los datos aportados por el capítulo tres; con el modelo de talud infinito para suelos saturados y suelos parcialmente saturados se evalúa la variación del factor de seguridad frente a condiciones de infiltración en 2-D derivadas de los umbrales lluvia – deslizamiento. También se estudia la variación del factor de seguridad con el tiempo, teniendo en cuenta las modelaciones de infiltración en 3-D.
- Se incluye un apéndice en medio impreso, el cual muestra con mayor amplitud la variación de la estabilidad con el tiempo, para las modelaciones de infiltración en 3-D.
- Adicionalmente se presenta un apéndice magnético, el cual incluye resultados de modelaciones que han servido de soporte en el estudio de la respuesta hídrica del suelo, pero que no se incorporan en el tercer capítulo.

CONCEPTOS TEÓRICOS

Para la realización del presente trabajo es necesario consultar conceptos teóricos y experiencias sobre el tema que aportarán las bases técnicas y permitirán implementar el conocimiento acumulado de diversos autores, analizando la influencia del agua en la respuesta hídrica para la estabilidad de taludes y laderas.

2.1 GENERALIDADES

La lluvia ha sido asociada por diversos autores a la falla de taludes como un detonante, porque se ha evidenciado la degradación de algunas propiedades mecánicas y físicas de materiales como suelos y rocas que conforman los taludes. El aumento de humedad en el suelo, inclusive en pequeñas cantidades, puede inducir cambios drásticos en su comportamiento mecánico como la resistencia, deformabilidad, permeabilidad y durabilidad, dependiendo de sus propiedades como textura, composición, fábrica, estructura y humedad.

Desde el siglo pasado, diversos investigadores, vienen realizando estudios con diferentes variables y situaciones, algunos con buenos resultados aproximando el comportamiento real observado en campo, otros investigando un tema específico, pero en general cada uno de los estudios realizados muestra avances que permiten modelar cada vez mejor el comportamiento de los taludes frente a detonantes como la lluvia.

El estudio de la infiltración, cuyo comienzo en los suelos fue en el campo agrícola, ha sido de gran ayuda no sólo para mejorar las técnicas de cultivos y la agricultura en general, también ha abordado el campo de la estabilidad de taludes y de obras civiles en general; hoy en día existe variedad de opciones en cuanto a teorías de infiltración, pero algunas de ellas sólo son válidas bajo determinadas condiciones, aunque otras han sido empleadas con éxito en el estudio de diferentes áreas y se han mantenido vigentes con el correr del tiempo, a pesar de haber sido desarrolladas inclusive antes formalizar el estudio de suelos como se conoce en la actualidad.

Al igual que la infiltración, el estudio de las propiedades del suelo sigue evolucionando y mostrando nuevos conceptos que al aplicarlos de forma adecuada pueden explicar y modelar algunos comportamientos observados en la superficie terrestre. Desde el concepto de esfuerzo efectivo hasta el estudio de suelos parcialmente saturados, se han presentado nuevas teorías que permiten aproximar cada vez mejor la modelación de la influencia de factores externos en el comportamiento de taludes. Algunos autores, especialmente en Hong Kong, han centrado sus estudios en la variación de factores de seguridad, profundidades críticas, tiempos máximos y mínimos de respuesta de un talud frente a la lluvia, estudiando y modelando casos particulares o tomando modelos

generales para probar nuevos algoritmos y nuevas teorías que permiten involucrar las investigaciones realizadas en el tema de infiltración y cambio de propiedades del suelo en la estabilidad de taludes.

2.2 INFILTRACIÓN

Según afirman Chow et al. (1994), el ciclo hidrológico del agua es el punto de partida para la hidrología, y la infiltración como parte de ese ciclo, que no tiene principio ni final, se presenta como un proceso por medio del cual el agua penetra desde la superficie del suelo hacia su interior y dentro de las posibles abstracciones de agua lluvia en superficie, es considerada como la mayor. Las propiedades del suelo, la vegetación y las condiciones en la superficie, entre otros, influyen en la tasa de infiltración, proceso que por su complejidad sólo puede ser modelado matemáticamente de forma aproximada.

Chow et al. (1994), mencionan que observando la distribución de humedad dentro del suelo, cerca de la superficie existe una delgada capa de infiltración o saturación, seguida por una zona parcialmente saturada, vadosa o capilar que hace la transición hacia la zona saturada o freática. El contenido de agua altera la tasa de infiltración, un suelo húmedo tiene una tasa más baja de infiltración que un suelo seco; de esta forma, frente a la lluvia un suelo húmedo tendrá mayor escorrentía, sin embargo el mismo suelo en condiciones secas tendrá mayor tasa de infiltración.

2.2.1 ECUACIONES DE INFILTRACIÓN

El proceso de infiltración y el movimiento del agua dentro del suelo, han sido estudiados por medio de principios físicos, relaciones y modelos matemáticos. Algunos autores han aportado avances en este campo y han propuesto diversas formulaciones matemáticas para explicar esta parte del ciclo hidrológico.

2.2.1.1 Ecuación de Richards

Freeze (1969), en su modelo matemático desarrolla la ecuación de Richards de la siguiente forma:

La existencia de flujo continuo entre la zona saturada y parcialmente saturada implica la existencia de un campo potencial, el cual es válido sobre y bajo la tabla de agua. El potencial hidráulico será:

$$\Phi = gz + \frac{p-p_0}{\rho} \quad (1)$$

Siendo Φ = potencial hidráulico, g = aceleración de la gravedad, z = cabeza de elevación, p = presión, p_0 = presión atmosférica, ρ = densidad del agua. Si $p_0 = 0$ y $p = \rho g \psi$, siendo ψ = cabeza de presión, se obtiene $\Phi = g(z + \psi)$ (2), y definiendo cabeza hidráulica como $\phi = \Phi/g$, se obtiene que la cabeza hidráulica o total será igual a la suma de la cabeza de elevación + la cabeza de presión, $\phi = z + \psi$ (3), conocida como la ecuación de Bernoulli.

Escribiendo la **ley de Darcy** para flujo en tres direcciones, que es la base para describir el movimiento del agua a través del suelo, de la siguiente forma:

$$v_x = -K(x, y, z, \psi) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (4a) \quad v_y = -K(x, y, z, \psi) \frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad (4b) \quad v_z = -K(x, y, z, \psi) \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (4c)$$

Para flujo inestable de un fluido compresible la ecuación de continuidad será:

$$-\left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] = \frac{\partial(\rho \theta)}{\partial t} \quad (5)$$

reemplazando (4) en (5), se obtendrá la ecuación generalizada de flujo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho K(x, y, z, \psi) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho K(x, y, z, \psi) \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho K(x, y, z, \psi) \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] = \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (6)$$

θ = contenido volumétrico de agua, t = tiempo, K = permeabilidad del suelo o conductividad hidráulica.

A partir de (6) es posible desarrollar ecuaciones en 1-D, 2-D y 3-D (flujo unidimensional, bidimensional y tridimensional) para flujo estable o inestable de un fluido compresible o incompresible y flujo en medio saturado o parcialmente saturado. Para suelo homogéneo ($K(x, y, z, \psi) = K(\psi)$), isotrópico, con fluido incompresible ($\rho = \text{constante}$ y $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$) y flujo en **medio parcialmente saturado** se obtiene la **ecuación de Richards**:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(\psi) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(\psi) \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad \text{3-D (7a)}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(\psi) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad \text{2-D (7b)}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad \text{1-D (7c)}$$

θ = contenido volumétrico de agua en función de la cabeza de presión ψ .

Tomando la capacidad de almacenamiento de agua o cambio volumétrico del contenido de agua por unidad de cambio en la cabeza de presión C como $C(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi}$ (8), que es la pendiente de la curva característica suelo-agua (SWCC), y sustituyendo (3) en (7), se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} + \frac{\partial z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad \text{3-D (9a)}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad \text{2-D (9b)}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad \text{1-D (9c)}$$

A partir de (6) para acuífero homogéneo ($K(x, y, z, \psi) = K(\psi) = \text{constante}$), isotrópico, con fluido incompresible ($\rho = \text{constante}$ y $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$) y $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$, flujo en **medio saturado** y reemplazando (3), se obtiene la **ecuación de Laplace**:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 \quad \text{3-D (10a)} \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 \quad \text{2-D (10b)} \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 \quad \text{1-D (10c)}$$

La ecuación de Richards es una de las más implementadas en diferentes software, debido a que la ecuación diferencial puede ser resuelta por diferencias finitas y ha demostrado ser bastante exacta a la hora de realizar predicciones, sobre todo en 2-D que es lo común en el software comercial, aunque también se puede trabajar en 3-D en software más reciente.

Algunos autores basados en la ecuación de Richards han desarrollado sus propias expresiones para hallar la **tasa o velocidad de infiltración** (v_i) y la **profundidad de agua infiltrada o infiltración acumulada** (z_w), que se obtiene integrando la tasa de infiltración en el periodo de tiempo estudiado.

2.2.1.2 Ecuación de Horton

Chow y et al. (1994) han citado a Horton (1933 y 1939) quien fue uno de los primeros en desarrollar una expresión para la infiltración, observando que la infiltración comienza a una tasa v_0 y decrece en forma exponencial hasta una tasa constante v_c .

$$v_{(t)} = v_c + (v_0 - v_c)e^{-kt} \quad (11)$$

k = constante de decrecimiento de la tasa de infiltración y t = tiempo.

Para la velocidad de infiltración se tiene:
$$v_i = v_c + (v_0 - v_c)e^{-kt} \quad (12)$$

Para la profundidad de infiltración se tiene:
$$z_w = v_c t + \frac{v_0 - v_c}{k} (1 - e^{-kt}) \quad (13)$$

Esta ecuación que tiene como particularidad que la tasa de infiltración se calcula en función del tiempo y no cuenta con variaciones en la intensidad de la lluvia. "No tiene ninguna disposición para la recuperación de la capacidad de infiltración durante períodos de infiltración baja o nula" (Haan et al., 1994). Según Turner (2006), citando a Rawls et al. (1993) "Una limitación adicional es que sólo es aplicable cuando la intensidad de la lluvia excede a v_c ". No hay lineamientos o tablas que provean los tres parámetros de la ecuación, ocasionalmente se pueden usar datos locales.

En esta ecuación se deberán conocer v_0 , v_c y k ; conociendo la curva $t - v_i$ del suelo que se quiere modelar, se puede hallar el valor de v_c y por lo tanto los valores de v_0 y k . Se grafica $\ln(v_i - v_c)$ en las ordenadas y t en las abscisas, hallando la pendiente de la curva que representa el valor de k y la intersección con las ordenadas (*interc.*) que deberá ser el exponente de la constante "e". El valor de v_0 se puede hallar de la siguiente forma: $v_0 = e^{\text{interc.}} + v_c$ (13-1).

Aunque Horton inicialmente no tiene en cuenta la ecuación de Richards, dado que trabaja con la expresión: $-\frac{dv_i}{dt} = k(v_i - v_c)$, Chow et al., mencionan que Eagleson (1970) y Raudkivi (1979) demostraron que la ecuación de Horton puede derivarse de la ecuación de Richards a partir de (7c), sustituyendo (3), tomando la difusividad del agua en el suelo $D = K \left(\frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right)$ y suponiendo que K y D son constantes independientes del contenido de agua de suelo, se obtiene: $D \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{\partial \theta}{\partial t}$ (14) que es la expresión del contenido de agua en función del tiempo y la profundidad en 1-D. Tal como Chow et al. (1994) lo afirman: "la ecuación de Horton se encuentra al calcular la tasa de difusión de humedad $D \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$ en la superficie del suelo".

2.2.1.3 Ecuación de Philip

Chow et al. (1994) citando a Philip (1957 y 1969) quien resolvió la ecuación de Richards en 1-D suponiendo que la permeabilidad puede variar con el contenido volumétrico de agua θ , empleando la transformación de Boltzmann $B(\theta) = zt^{-1/2}$ y resolviendo la ecuación con una serie infinita acumulada $z_{(t)}$, aproximada por:

$$z_{(t)} = St^{1/2} + C_p t \quad (15)$$

S = parámetro de adsorción que es función del potencial de succión (sortividad), t = tiempo y C_p = tasa constante

Para la velocidad de infiltración se tiene: $v_i = \frac{1}{2} St^{-1/2} + C_p \quad (16)$

Para la profundidad de infiltración se tiene: $z_w = St^{1/2} + C_p t \quad (17)$

Si hay tiempos muy largos $t \rightarrow \infty$, v_i tiende a K_s (permeabilidad saturada), pero $C_p \neq K_s$. Si se tiene infiltración horizontal, desaparecen los segundos términos de las ecuaciones, que es similar a la ecuación de Kostikov (1932). Turner (2006) citando a Philip (1957) y Talsma (1969) menciona que $C_p \cong K_s/3$, aunque en algunos casos se toma $C_p = 2/3 K_s$ (Youngs, 1968; Talsma y Parlange, 1972). Turner (2006) trabaja con $C_p = 2/3 K_{fs}$ y $C_p = K_{fs}/3$, tomando el valor de $K_{fs} = K_s/2$ como lo trabaja la ecuación de Green-Ampt. Como se puede apreciar, para hallar el valor de C_p se tienen diferentes versiones que obedecen a cómo se acomoda mejor la curva al suelo estudiado. La sortividad se determina con la expresión: $S = (2 \Delta \theta K_s \psi)^{1/2}$ (17-1). $\Delta \theta$ = diferencia entre el contenido volumétrico de agua saturado y el inicial del suelo ($\theta_s - \theta_i$). ψ = cabeza de presión en el frente húmedo, en este caso será succión. Turner (2006) trabaja $K_{fs} = K_s/2$ para la ecuación (17-1).

2.2.1.4 Ecuación de Iverson

Iverson (2000) reescribe la ecuación de Richards referenciado al sistema de coordenadas de la Figura 1, de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_L(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_L(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right] = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (18)$$

α = ángulo del talud variando sólo en x y z , K_L = permeabilidad en las direcciones laterales x y y , K_z = permeabilidad perpendicular al talud (dirección z siempre normal al talud). Adicionalmente define las permeabilidades normalizadas K^* respecto de la permeabilidad saturada o máxima K_s :

$$K_L^* = \frac{K_L(\psi)}{K_s} \quad K_z^* = \frac{K_z(\psi)}{K_s} \quad (19)$$

Relacionando las permeabilidades con las difusividades D :

$$D_L = \frac{K_L(\psi)}{c(\psi)} \quad D_z = \frac{K_z(\psi)}{c(\psi)} \quad D_0 = \frac{K_s}{c_0} \quad (20)$$

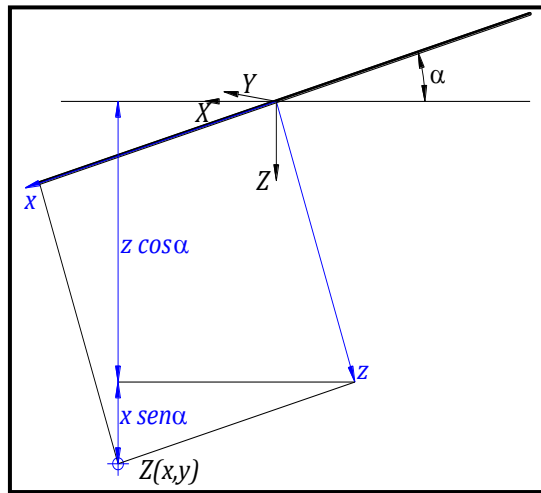


Figura 1. Definición del sistema coordinado local usado para analizar la ecuación de Richards, letras minúsculas (Adaptado de Iverson, 2000)

C = definida en (8), C_0 = mínimo valor de C (suelo saturado) luego D_0 es la máxima característica de difusividad que gobierna la trasmisión de cabeza de presión y provee un valor de referencia. Iverson (2000) enfatiza que el objetivo de normalizar es el valor que tiene la presión de poros a la profundidad $z = H$ (normal al talud) y la posición espacial (x , y) en función del tiempo. La posición espacial determina la extensión en que la infiltración afecta la cabeza de presión (x , y , H). Se maneja la escala en z , para referenciar la cabeza de presión ψ a la profundidad H y A será el área de captación de la lluvia que influencia $\psi(x, y, H, t)$ si la lluvia persiste:

$$\psi^* = \frac{\psi}{H} \quad z^* = \frac{z}{H} \quad x^* = \frac{x}{\sqrt{A}} \quad y^* = \frac{y}{\sqrt{A}} \quad (21)$$

Para analizar la respuesta de la cabeza de presión debido a la lluvia en taludes, introduce la relación de longitud de escala ε compuesta por la escala temporal de difusión de presión

$$H^2/D_0 \text{ y la escala de tiempo } A/D_0: \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{H^2 D_0}{A D_0}} = \frac{H}{\sqrt{A}} \quad (22)$$

Para saber si la respuesta del talud debe ser analizada a largo o corto plazo, se deberá saber si $t > A/D_0$ ó $t \ll A/D_0$, respectivamente.

Sustituyendo (19), (20) y (21) en (18), tomando $t^* = tD_0/A$, multiplicando todo por H/Ks se obtiene la siguiente expresión para el comportamiento a **largo plazo**:

$$\varepsilon^2 \frac{\partial}{\partial x^*} \left[K_L^* \left(\frac{\partial \psi^*}{\partial x^*} - \frac{1}{\varepsilon} \text{sen } \alpha \right) \right] + \varepsilon^2 \frac{\partial}{\partial y^*} \left[K_L^* \frac{\partial \psi^*}{\partial y^*} \right] + \frac{\partial}{\partial z^*} \left[K_z^* \left(\frac{\partial \psi^*}{\partial z^*} - \cos \alpha \right) \right] = \varepsilon^2 \frac{C(\psi)}{c_0} \frac{\partial \psi^*}{\partial t^*} \quad (23)$$

Si se asume que $\varepsilon \ll 1$, puede despreciarse y la ecuación para largo plazo será:

$$\frac{\partial}{\partial z^*} \left[K_z^* \left(\frac{\partial \psi^*}{\partial z^*} - \cos \alpha \right) \right] = 0 \quad (24) \text{ es decir, unidimensional}$$

Sustituyendo (19), (20) y (21) en (18), tomando $t^* = tD_0/H^2$, multiplicando todo por H/Ks se obtiene la siguiente expresión para el comportamiento a **corto plazo**:

$$\varepsilon^2 \frac{\partial}{\partial x^*} \left[K_L^* \left(\frac{\partial \psi^*}{\partial x^*} - \frac{1}{\varepsilon} \text{sen } \alpha \right) \right] + \varepsilon^2 \frac{\partial}{\partial y^*} \left[K_L^* \frac{\partial \psi^*}{\partial y^*} \right] + \frac{\partial}{\partial z^*} \left[K_z^* \left(\frac{\partial \psi^*}{\partial z^*} - \cos \alpha \right) \right] = \frac{C(\psi)}{c_0} \frac{\partial \psi^*}{\partial t^*} \quad (25)$$

Si se asume que $\varepsilon \ll 1$, puede despreciarse y la ecuación para largo plazo será:

$$\frac{\partial}{\partial z^*} \left[K_z^* \left(\frac{\partial \psi^*}{\partial z^*} - \cos \alpha \right) \right] = \frac{C(\psi)}{c_0} \frac{\partial \psi^*}{\partial t^*} \quad (26)$$

2.2.2 OTRAS ECUACIONES DE INFILTRACIÓN

Otros autores han encontrado ecuaciones de infiltración, sin tener en cuenta la ecuación de Richards, partiendo de otros conceptos.

2.2.2.1 Ecuación de Green - Ampt

Chow et al. (1994) citando a Green - Ampt (1911), soportados en la ley de Darcy propusieron un modelo de infiltración basados en una solución analítica exacta. Tomando en cuenta $\Delta\theta$ como la porosidad humedecible, o la diferencia entre el contenido volumétrico saturado de agua y el inicial ($\theta_s - \theta_i$) en el suelo y L_f como la distancia desde la superficie hasta el frente húmedo, han definido la infiltración acumulada como $z_w = \Delta\theta L_f$ (27); en la Figura 2 se observa la representación del modelo de Green - Ampt. Citando la ley de Darcy, estos autores han encontrado que la tasa de infiltración se expresa de la siguiente forma:

$$v_i = K_{fs} \frac{z_w + \Delta\theta\psi}{z_w} \quad (28)$$

ψ = cabeza de presión en el frente húmedo, en este caso será succión. En este caso K_{fs} será la mitad del valor de la conductividad hidráulica saturada ($K_{fs} = Ks/2$). Derivando la ecuación (28) se tiene una nueva expresión para calcular la profundidad de infiltración z_w y calcular el tiempo t_w necesario para saturar el suelo.

$$t_w = \frac{1}{K_{fs}} \left[z_w - \Delta\theta\psi \ln \left(\frac{\Delta\theta\psi + z_w}{\Delta\theta\psi} \right) \right] \quad (29a) \quad z_w = t_w K_{fs} + \Delta\theta\psi \ln \left(\frac{\Delta\theta\psi + z_w}{\Delta\theta\psi} \right) \quad (29b)$$

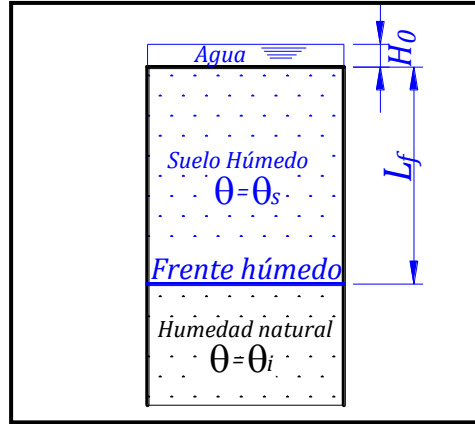


Figura 2. Representación del modelo de Green – Ampt (Adaptado de AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, Hydrology Handbook, 1994).

2.2.2.2 Ecuación de Kostiakov

Turner (2006) ha citado a Kostiakov (1932) y Lewis (1938), quienes desarrollaron una ecuación empírica basada en el ajuste de la curva de datos de campo. Relaciona la infiltración en el tiempo como una función de potencia.

$$v_{(t)} = K_k t^{-\alpha} \quad (30)$$

$v_{(t)}$ = capacidad de infiltración, t = tiempo luego que la infiltración comienza, K_k y α son constantes que dependen del suelo y las condiciones iniciales que deben ser medidos de los datos de infiltración. Como lo cita Turner (2006), Criddle et al. (1956) aplicando logaritmo base 10 a los dos lados de la ecuación y graficando $\log v_{(t)}$ en las ordenadas y $\log t$ en las abscisas, hallan K_k y $-\alpha$ como el intercepto de la curva ($t=1$) y la pendiente de la misma, respectivamente. Mbagwu (1994) encontró correlacionados el coeficiente C_p de Philip y K_k de Kostiakov con la ecuación $K_k = 24,22 C_p - 0,83$ con un coeficiente de correlación $r = 0,9735$ y $p \leq 0,001$; también encontró una correlación lineal entre K_k y Ks ($r = 0,9823$ y $p \leq 0,001$). Integrando (30), se puede conocer el valor de la infiltración acumulada: $z_w = \frac{K_k t^{1-\alpha}}{1-\alpha} \quad (31)$.

Cuando el suelo se satura por una infiltración prolongada, Mezencev (1948) propuso adicionar la tasa de infiltración final alcanzada v_c , resultando $v_{(t)} = K_k t^{-\alpha} + v_c \quad (32)$ y de esta forma muy similar a la expresión de Philip (1957).

Las ecuaciones de Kostiakov y Horton entregan tasas de infiltración ajustadas a la realidad, puesto que se basan en datos medidos en campo cuando las condiciones supuestas son similares a las de las mediciones; sin embargo parámetros que no se puedan medir directamente pueden equivocar parcialmente los resultados.

2.2.2.3 Ecuación de Holtan

Haan et al. (1994) han citado a Holtan (1961), quien trabajó en una ecuación empírica en la cual la tasa de infiltración es proporcional a la capacidad no usada del suelo para retener agua. Según Holtan (1967) la ecuación se desarrolló en el laboratorio hidrográfico del USDA (EE UU) para estimar la infiltración usando información disponible en la mayoría de los suelos de EE UU. Además de la capacidad del suelo para retener agua, la ecuación se basa en las premisas de efecto del recorrido de las raíces de las plantas y porosidad conectada en superficie.

$$v_{(t)} = aF_p^n + v_{fin} \quad (33)$$

v_{fin} = tasa final de infiltración, a = índice de porosidad conectada en superficie, que es función de las condiciones de superficie y densidad de las raíces de las plantas, $n = 1,4$ para muchos suelos (Holtan recomienda $n = 1,4$ si no hay datos), y F_p = capacidad no usada del suelo para retener agua. "El modelo de Holtan de infiltración tiene ventaja sobre el modelo de Horton en que tiene mayores bases físicas y puede describir la infiltración y la recuperación de la capacidad de infiltración durante períodos de infiltración baja o nula" (Haan et al., 1994). Algunos autores como Terstriep y Stall (1974) recomiendan valores y tablas que suministran los parámetros de la ecuación.

$F_p = (\theta_s - \theta_i)d$ (34a), donde θ_s = contenido volumétrico de agua del suelo saturado, θ_i = contenido volumétrico actual o inicial de agua en el suelo y d = profundidad de la capa superficial del suelo (espesor del suelo que se estudia). El principal obstáculo es encontrar la distancia d . F_p también puede ser hallado con: $F_{p_t} = F_{p_{t-1}} - v_{i_{t-1}}\Delta t + v_{fin}\Delta t$ (34b), donde $F_{p_t} = F_p$ en el tiempo t , $F_{p_{t-1}} = F_p$ en el tiempo $t-1$, $v_{i_{t-1}}$ = tasa de infiltración en el tiempo $t-1$, Δt = intervalo de tiempo. Para el valor del parámetro a se ha propuesto la Tabla 1:

Tabla 1. Estimación del parámetro a (Frere et al., 1975). (Adoptado de AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1994)

Uso de tierra o cobertura	Clasificación fundamental del área*	
	Pobre	Buena
Barbecho**	0,10	0,30
Cultivos en fila	0,10	0,20
Granos pequeños	0,20	0,30
Heno (legumbres)	0,20	0,40
Heno (césped)	0,40	0,60
Pastos (pajonales)	0,20	0,40
Pastos temporales (césped)	0,20	0,60
Pastos permanentes (césped)	0,80	1,00
Bosques y selvas	0,80	1,00

* Ajustes necesarios para "mala hierba" y "pastoreo".

** Para tierras de potrero solamente, condición pobre significa "después de cosechar en fila" y buena condición significa "después del césped".

Para el valor de la tasa final de infiltración v_{fin} se ha propuesto la Tabla 2:

Tabla 2. Estimación de la tasa final de infiltración v_{fin} (Musgrave, 1955).
(Adoptado de AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1994)

Grupo hidrológico del suelo	v_{fin} [cm/h]
A	0,76
B	0,38 - 0,76
C	0,13 - 0,38
D	0,00 - 0,13

Para saber el grupo hidrológico del suelo, se tiene la Tabla 3:

Tabla 3. Grupo hidrológico del suelo. (Adoptado de Mitchell, R.J. Appendix A. Hydrologic Soil Groups)

Grupo Hidrológico	Suelo
A	Arena, Franco arenoso o Areno francoso
B	Limo margoso o Franco
C	Franco arcilla arenosa
D	Franco arcilloso, Franco limo-arcilloso, arcilla arenosa, arcilla limosa o arcilla

2.2.2.4 Ecuación de Lumb

Kim et al. (2004) han citado a Lumb (1975), quien propuso una ecuación para estimar la profundidad del frente húmedo (L_f), basada en el grado de saturación inicial y final del suelo.

$$L_f = \frac{K_s t}{n(S_f - S_0)} \quad (35)$$

K_s = Permeabilidad del suelo en condiciones saturadas, t = tiempo, n = porosidad del suelo, S_0 y S_f = grado de saturación inicial y final, respectivamente; $n(S_f - S_0) = \Delta\theta$. "Esta ecuación no tiene en cuenta la intensidad de la lluvia ni la magnitud de la succión matricial presente en el suelo. Por lo que su uso no resulta satisfactorio cuando se involucra infiltración debida a lluvia en suelos parcialmente saturados." (Kim et al., 2004). Ng y Shi (1998) usaron esta ecuación para estimar la localización del nivel freático para el análisis de estabilidad de un talud en Hong Kong.

2.2.3 CONSIDERACIONES RESPECTO DE LA INFILTRACIÓN

En este trabajo, cuando se necesita ponderar datos a diferentes profundidades se aplica la siguiente expresión:

$$P_{ef} = \frac{D}{\frac{d_1}{P_1} + \frac{d_2}{P_2} + \frac{d_3}{P_3} + \dots} \quad (36)$$

P_{ef} = parámetro efectivo o ponderado, d_1, d_2, d_3 = profundidades de las capas, P_1, P_2, P_3 = parámetro en cada capa y $D = d_1 + d_2 + d_3 + \dots$

Qi (2006) realizó una comparación de las ecuaciones de Green - Ampt, Phillip y Richards, encontrando la mejor representación de la infiltración con la ecuación de Richards, pero al ser un poco más elaborada, puede tardar más en arrojar el resultado si no se programa su algoritmo.

Chen y Young (2006) luego de modelar la infiltración tanto en una superficie horizontal, como en inclinación de 30° , concluyeron que la ecuación de Green - Ampt y la de Richards arrojan resultados muy cercanos. Estudiando el efecto de la lluvia cuando esta no es vertical, por medio de Green - Ampt, encontraron que no se produce un efecto significativo en la profundidad de la infiltración, excepto en inclinaciones mayores a 40° .

Según Chow et al. (1994), cuando la intensidad de lluvia I es mayor a la tasa de infiltración v_i , la diferencia $(I - v_i)$ será la escorrentía en la superficie del terreno que finalmente encontrará su camino hacia el cuerpo de captación de agua más cercana.

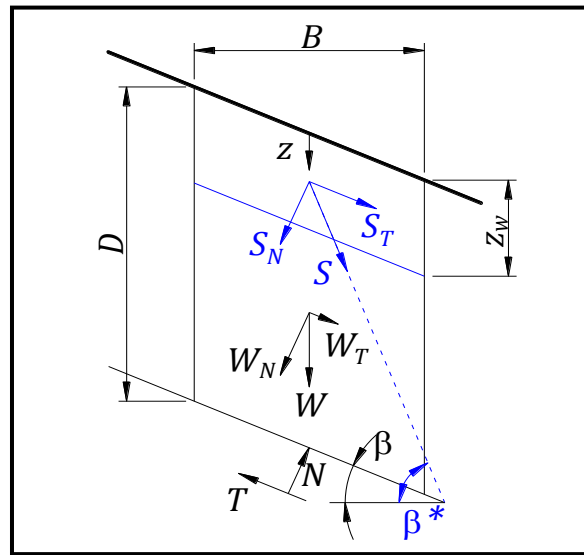


Figura 3. Diagrama de cuerpo libre de un talud infinito (Adaptado de Collins y Znidarcic, 2004)

Collins y Znidarcic (2004) aproximan una solución respecto de la dirección de la fuerza de infiltración, considerando talud infinito en 2-D (Figura 3). De esta forma el flujo de la infiltración no siempre se considera paralelo a la cara del talud. Adicionalmente proponen la siguiente ecuación relacionada con la cabeza de presión ψ , para encontrar la dirección de la fuerza de infiltración a cualquier profundidad z dentro del frente húmedo.

$$\psi = \frac{z}{1 + \tan \beta \tan \beta^*} \quad (37a)$$

$$\beta^* = \tan^{-1} \left[\left(\frac{z}{\psi} - 1 \right) \frac{1}{\tan \beta} \right] \quad (37b)$$

La fuerza de infiltración S se tomará $S = i \gamma_w$ (38), i = gradiente hidráulico de la infiltración y γ_w = peso unitario del agua. β = inclinación del talud respecto de la

horizontal y β^* = inclinación de S respecto de la horizontal. Collins y Znidarcic (2004) también calculan el gradiente hidráulico i como:

$$i = \frac{\text{sen } \beta}{\cos(\beta - \beta^*)} \quad (39)$$

Si $\beta = \beta^*$ hay flujo paralelo a la superficie del talud, entonces $i = \text{sen } \beta$.

2.2.4 EJERCICIO DE APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE INFILTRACIÓN

Tomando como base los datos que Turner (2006) usó para comparar algunas ecuaciones de infiltración, simulando lluvia por medio de aspersores instalados en dos áreas de la universidad de Maryland, se realizará una comparación de ecuaciones de infiltración siguiendo las expresiones citadas en el numeral 2.2.1 y 2.2.2 de este documento. Aunque la simulación de la lluvia se realizó en las instalaciones de Poplar Hill, cerca de Quantico y en las instalaciones de Upper Marlboro en el condado de Prince George, campos pertenecientes a la Universidad de Maryland, solamente se tendrá en cuenta los datos de Upper Marlboro para el presente ejercicio de aplicación. Los datos que se presentan en la Tabla 4, han sido tomados de mediciones en campo o laboratorio, según lo reporta Turner (2006). La simbología (definida en el numeral 2.3), es:

K_s = Conductividad hidráulica saturada.

θ_s , θ_r , θ_i = Contenido volumétrico de agua saturado, residual e inicial del suelo, respectivamente.

h_b = Valor de entrada de aire.

λ = Índice de distribución de tamaño de poros.

$\psi = \frac{h_{ce}\eta}{\eta-1}$ = Cabeza de presión en el frente húmedo, en este caso será succión.

α , n = Parámetros de curva característica suelo-agua (SWCC), en el espacio $\theta - \psi$. En el numeral 2.3.1 se describen los parámetros propuestos por Van Genuchten (1980).

* Valores necesarios para el algoritmo que desarrolla el software Hydrus®, trabajando con la ecuación de Richards y Van Genuchten (1980), calculados para este trabajo.

Tabla 4. Parámetros para el sitio de Upper Marlboro. (Adoptado de Turner, 2006)

Prof. [cm]	Medición	K_s [cm/h]	θ_s [cm ³ /cm ³]	θ_r [cm ³ /cm ³]	S_r	h_b [cm]	$h_{ce} = h_b/2$ [cm]	λ	$\eta = 2 + 3\lambda$	ψ [cm]	θ_i [cm ³ /cm ³]
0 - 6	1	37,69	0,44	0,16	0,36	24,22	12,11	0,88	4,64	-15,44	0,222
0 - 6	2	42,35	0,45	0,17	0,38	22,69	11,35	0,72	4,16	-14,94	
0 - 6	3	14,71	0,37	0,11	0,30	61,78	30,89	1,22	5,66	-37,52	
0 - 6	4	51,58	0,42	0,14	0,33	36,60	18,30	0,89	4,67	-23,29	
0 - 6	5	19,08	0,44	0,09	0,20	63,64	31,82	1,39	6,17	-37,97	
10 - 16	1	18,32	0,31	0,08	0,26	38,58	19,29	1,04	5,12	-23,97	0,154
10 - 16	2	19,12	0,34	0,08	0,24	34,35	17,18	0,74	4,22	-22,51	
10 - 16	3	10,84	0,36	0,12	0,33	34,76	17,38	0,95	4,85	-21,89	
10 - 16	4	8,01	0,34	0,12	0,35	37,56	18,78	0,89	4,67	-23,90	
10 - 16	5	9,17	0,27	0,10	0,37	49,13	24,57	1,08	5,24	-30,36	

Tabla 4. Parámetros para el sitio de Upper Marlboro. (Adoptado de Turner, 2006)

Prof. [cm]	Medición	K_s [cm/h]	θ_s [cm ³ /cm ³]	θ_r [cm ³ /cm ³]	S_r	h_b [cm]	$h_{ce} = h_b/2$ [cm]	λ	$\eta = 2 + 3\lambda$	ψ [cm]	θ_i [cm ³ /cm ³]
20 - 26	1	1,8	0,30	0,09	0,30	38,22	19,11	1,13	5,39	-23,46	0,164
20 - 26	2	2,61	0,32	0,12	0,38	45,19	22,60	0,81	4,43	-29,18	
20 - 26	3	8,91	0,35	0,08	0,23	29,72	14,86	0,71	4,13	-19,61	
20 - 26	4	6,51	0,34	0,08	0,24	50,78	25,39	0,93	4,79	-32,09	
20 - 26	5	10,41	0,34	0,08	0,24	27,98	13,99	0,63	3,89	-18,83	
30 - 36	1	13,12	0,34	0,14	0,41	53,87	26,94	0,84	4,52	-34,59	0,191
30 - 36	2	8,5	0,39	0,17	0,44	35,92	17,96	0,88	4,64	-22,89	
30 - 36	3	8,71	0,35	0,16	0,46	23,36	11,68	0,35	3,05	-17,38	
30 - 36	4	4,6	0,35	0,14	0,40	65,19	32,60	1,32	5,96	-39,17	
30 - 36	5	2,89	0,34	0,09	0,26	29,41	14,71	0,67	4,01	-19,59	
40 - 46	1	3,66	0,38	0,23	0,61	29,55	14,78	0,54	3,62	-20,41	0,309
40 - 46	2	10,2	0,43	0,28	0,65	77,69	38,85	0,39	3,17	-56,75	
40 - 46	3	0,47	0,40	0,29	0,73	56,62	28,31	0,46	3,38	-40,20	
40 - 46	4	2,25	0,36	0,19	0,53	39,72	19,86	0,58	3,74	-27,11	
40 - 46	5	5,07	0,36	0,20	0,56	35,30	17,65	0,66	3,98	-23,57	
50 - 56	1	0,97	0,38	0,27	0,71	57,32	28,66	0,51	3,53	-39,99	0,315
50 - 56	2	1,29	0,37	0,15	0,41	74,71	37,36	0,31	2,93	-56,71	
50 - 56	3	1,42	0,40	0,30	0,75	77,03	38,52	0,71	4,13	-50,82	
50 - 56	4	0,47	0,40	0,19	0,48	104,96	52,48	0,84	4,52	-67,39	
50 - 56	5	1,84	0,42	0,27	0,64	35,82	17,91	0,29	2,87	-27,49	

Se tiene la Tabla 5 de promedios aritméticos, con la cual se comienza la modelación de las ecuaciones. La última fila se realizó con promedios ponderados según la ecuación (36).

Tabla 5. Valores promedio de Upper Marlboro. (Adaptado de Turner, 2006)

Profundidad [cm]	θ_i [cm ³ /cm ³]	θ_s [cm ³ /cm ³]	$\theta_s - \theta_i$ [cm ³ /cm ³]	K_s [cm/h]	ψ [cm]	θ_r [cm ³ /cm ³]	α^*	n^*
0 - 10	0,222	0,424	0,202	23,827	-17,886	0,134	0,397	1,601
10 - 20	0,154	0,324	0,170	9,340	-23,068	0,100	0,099	2,644
20 - 30	0,164	0,330	0,166	4,958	-20,634	0,090	0,078	3,158
30 - 40	0,191	0,354	0,163	6,175	-19,954	0,140	0,083	3,618
40 - 50	0,309	0,386	0,077	2,863	-23,698	0,238	0,057	2,685
50 - 60	0,315	0,394	0,079	0,910	-33,738	0,236	0,036	3,999
Promedio ponderado	0,209	0,365	0,123	3,060	-22,249	0,136		

La Tabla 6 y Figura 4 muestran los valores de infiltración presentados por Turner (2006) como los datos medidos en campo para el suelo de Upper Marlboro, el cual es descrito como franco arenoso fino - arcilla arenosa (fine sandy loam – sandy clay). Se menciona que las mediciones se realizaron en superficie, pero no se especifica cómo se realizaron.

Tabla 6. Tasa de infiltración observada en campo (Upper Marlboro). (Adaptado de Turner, 2006)

t [h]	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
v_i [cm/h]	5,048	5,048	5,048	5,048	4,850	4,277	3,400	2,882	2,490	2,217	2,063	1,940	1,880

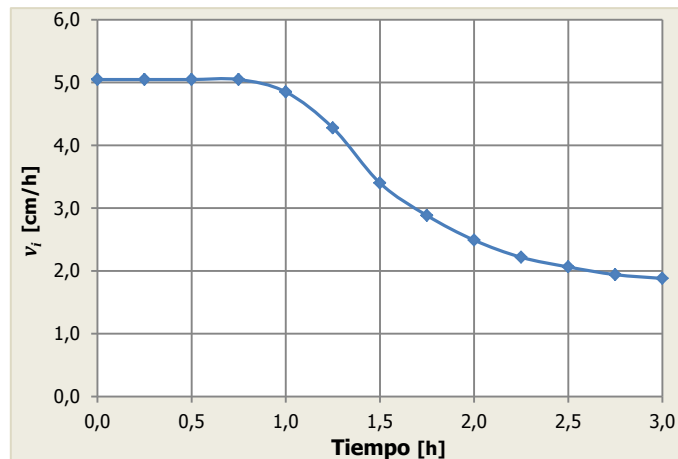


Figura 4. Curva de tasa de infiltración v_i – tiempo t ; datos observados en campo para el suelo de Upper Marlboro. (Adaptado de Turner, 2006)

En la Figura 4 se observa que la primera hora se mantiene constante la tasa de infiltración, lo que puede deberse a que el terreno pudo comenzar el ejercicio estando seco. En la calibración del modelo, Turner (2006) presenta la gráfica real observada en campo, cuyos datos corresponden a la Tabla 6 y Figura 4 del presente documento; pero evaluando las diversas ecuaciones, Turner (2006) tabula los valores de v_i observados en la Tabla 6 sin tener en cuenta la primera hora, es decir, solamente tabula las dos horas finales pero tomando como 0,0 horas la hora 1,0 de la Tabla 6. En este, caso la referencia de comparación será los datos de la Tabla 6 y Figura 4, que corresponden a los datos observados en campo.

Modelación de la ecuación de Richards

Siguiendo lo señalado en el numeral 2.2.1.1, con el software Hydrus ® versión 1.11, se ha modelado la infiltración para el suelo de Upper Marlboro. Este software trabaja modelando la ecuación de Richards en 1-D, 2-D y 3-D, para este ejercicio se ha modelado en 1-D. Se ha tenido en cuenta los valores relacionados en la Tabla 5 para realizar la modelación del suelo con la ecuación de Richards, ponderándolos con la profundidad. Tomando en cuenta que la ecuación de Iverson finalmente tiene la misma forma y los mismos componentes que la ecuación de Richards, y que para este ejercicio se toma un medio en 1-D en terreno plano, se tendrán los resultados de Richards equivalentes a los resultados de Iverson y por lo tanto no se modelará Iverson.

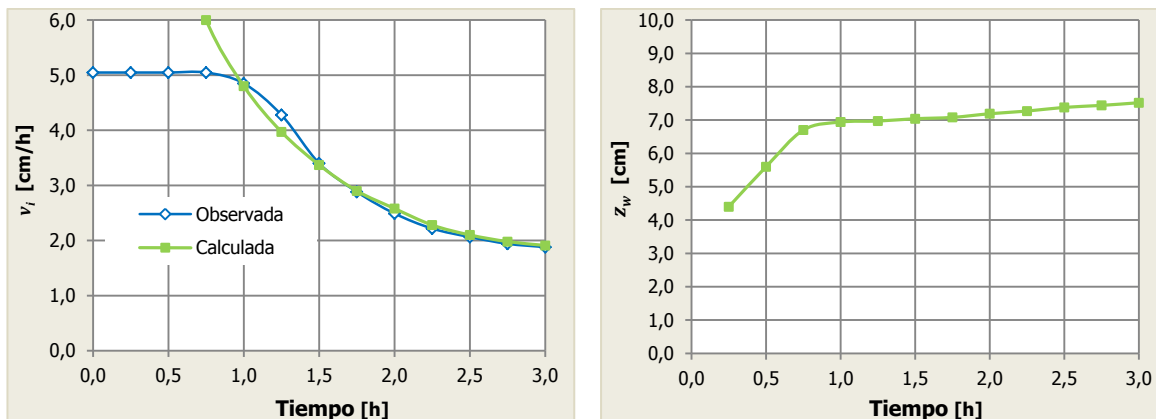
En las Tablas 7 y 8 se muestran los valores efectivos o ponderados con los que se modela la ecuación de Richards y los valores hallados de tasa de infiltración e infiltración acumulada para el suelo de Upper Marlboro, respectivamente. La Figura 5 muestra las curvas de v_i y z_w , para dicho suelo.

Tabla 7. Parámetros ponderados, ecuación de Richards

θ_i	θ_s	θ_r	ψ	Ks	α	n
[cm ³ /cm ³]	[cm ³ /cm ³]	[cm ³ /cm ³]	[cm]	[cm/h]		
0,209	0,365	0,136	-22,45	3,06	0,072	3,094

Tabla 8. Cálculo de v_i y z_w con la ecuación de Richards

t [h]	0,000	0,250	0,500	0,750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000
v_i [cm/h]	----	12,000	8,000	6,000	4,800	3,970	3,370	2,900	2,580	2,280	2,100	1,980	1,910
z_w [cm]	----	4,400	5,600	6,700	6,940	6,970	7,040	7,080	7,190	7,270	7,380	7,440	7,520
Lf [cm]	----	22,600	30,000	38,150	41,950	47,000	52,300	54,000	56,300	57,200	59,300	61,200	62,600

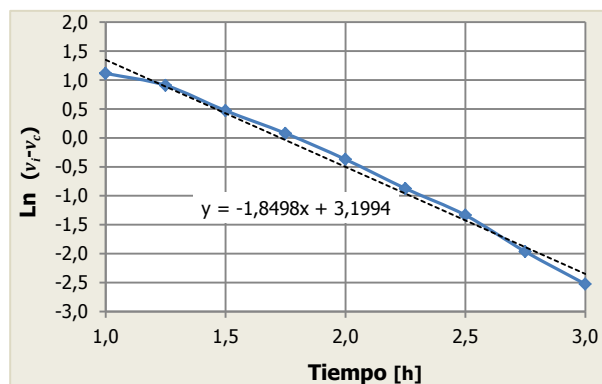
**Figura 5.** Curvas de infiltración calculadas con la ecuación de Richards para el suelo de Upper Marlboro. (Izquierda) Tasa de infiltración, (Derecha) Infiltración acumulada.

Modelación de la ecuación de Horton

Como ya se ha mencionado, se puede modelar la tasa de infiltración v_i y la infiltración acumulada z_w . En este caso sólo se tendrá en cuenta desde 1,0 hora para realizar la regresión. Los cálculos se realizan como se indica en el numeral 2.2.1.2., según la Tabla 9:

Tabla 9. Cálculo de los parámetros de Horton (Upper Marlboro)

t [h]	0,000	0,250	0,500	0,750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000
v_i [cm/h]	5,048	5,048	5,048	5,048	4,850	4,277	3,400	2,882	2,490	2,217	2,063	1,940	1,880
$v_i - v_c$ [cm/h]	3,248	5,048	5,048	5,048	4,850	4,277	3,400	2,882	2,490	2,217	2,063	1,940	1,880
$\ln(v_i - v_c)$	1,178	1,619	1,619	1,619	1,579	1,453	1,224	1,058	0,912	0,796	0,724	0,663	0,631

**Figura 6.** Curva $\ln(v_i - v_c)$ – tiempo t , ecuación de Horton.

Tomando en cuenta las Figuras 4 y 6, se han determinado los siguientes valores:

$$v_c = 1,80 \text{ [cm/h]} \quad k = 1,8498 \quad v_0 = 26,318 \text{ [cm/h]}$$

En la Tabla 10 y Figura 7 se observan los resultados de la modelación del suelo con la ecuación de Horton.

Tabla 10. Cálculo de v_i y z_w con la ecuación de Horton

t [h]	0,000	0,250	0,500	0,750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000
v_i [cm/h]	26,318	17,240	11,523	7,923	5,656	4,228	3,329	2,763	2,406	2,182	2,040	1,951	1,895
z_w [cm]	0,000	5,358	8,898	11,294	12,970	14,192	15,128	15,884	16,526	17,098	17,624	18,122	18,603

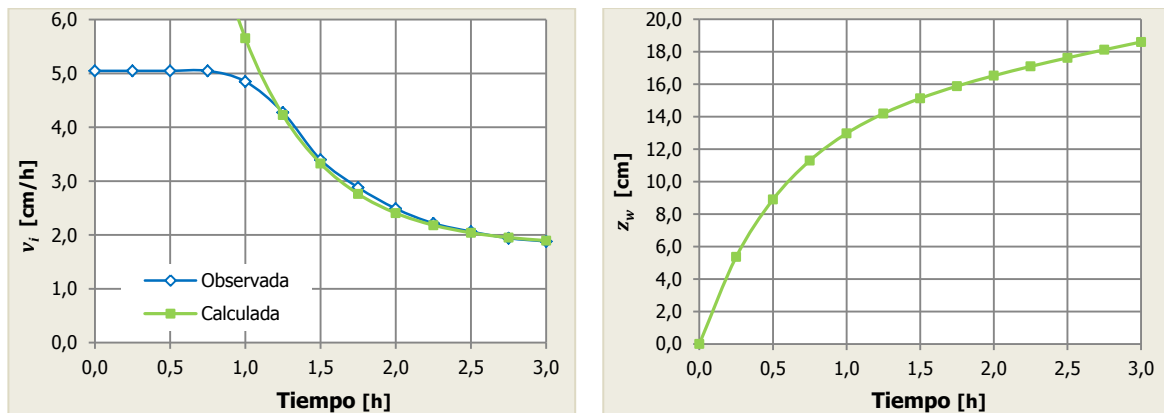


Figura 7. Curvas de infiltración calculadas con la ecuación de Horton para el suelo de Upper Marlboro. (Izquierda) Tasa de infiltración, (Derecha) Infiltración acumulada.

Modelación de la ecuación de Philip

Con la ecuación de Philip se modela la tasa de infiltración v_i y la infiltración acumulada z_w . Se trabajará con el periodo de tiempo total teniendo en cuenta las capas de la Tabla 5. Los cálculos se realizan como se indica en el numeral 2.2.1.3; en este caso será necesario calcular los valores de sortividad efectivos (S_{ef}), ponderados como se indica en la ecuación (36). Se usará $K_{fs} = Ks/2$, tomando el valor ponderado de Ks según la Tabla 5; para el valor de C_p se tendrá $C_p = K_{fs} / 3$ y $C_p = 2/3K_{fs}$. En este caso el mejor resultado se ha obtenido tomando $C_p = 2/3K_{fs} = Ks/3$. En las Tablas 11 y 12 y Figura 8 se observan los resultados de la modelación con la ecuación de Philip.

Tabla 11. Cálculo de la sortividad S para cada capa

Profundidad	$\theta_s - \theta_i$	Ks	$K_{fs} = Ks/2$	ψ	$S = (2(\theta_s - \theta_i)K_{fs} \psi)^{1/2}$
[cm]	[cm ³ /cm ³]	[cm/h]	[cm/h]	[cm]	
0 - 10	0,202	23,827	11,913	-17,886	9,278
10 - 20	0,170	9,340	4,670	-23,068	6,052
20 - 30	0,166	4,958	2,479	-20,634	4,121
30 - 40	0,163	6,175	3,088	-19,954	4,482
40 - 50	0,077	2,863	1,431	-23,698	2,285
50 - 60	0,079	0,910	0,455	-33,738	1,557

Tabla 12. Cálculo de v_i y z_w para la ecuación de Philip

t [h]	0,000	0,250	0,500	0,750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000
L_f [cm]	0,000	6,157	12,315	18,472	24,630	30,787	36,944	43,102	49,259	55,417	61,574	67,732	73,889
S_{ef}	----	9,278	8,428	7,456	6,391	5,773	5,510	4,929	4,306	3,635	3,208	3,073	3,003
v_i^* [cm/h]	----	9,788	6,470	4,815	3,706	3,092	2,759	2,373	2,032	1,722	1,524	1,437	1,377
v_i^{**} [cm/h]	----	10,298	6,980	5,325	4,216	3,602	3,269	2,883	2,542	2,232	2,034	1,947	1,887
z_w^{**} [cm]	0,000	4,894	6,470	7,222	7,411	7,729	8,278	8,305	8,129	7,748	7,622	7,902	8,261

* Valor calculado con $C_p = K_{fs}/3$. ** Valor calculado con $C_p = 2/3 K_{fs}$. L_f = prof. frente húmedo medido desde superficie.

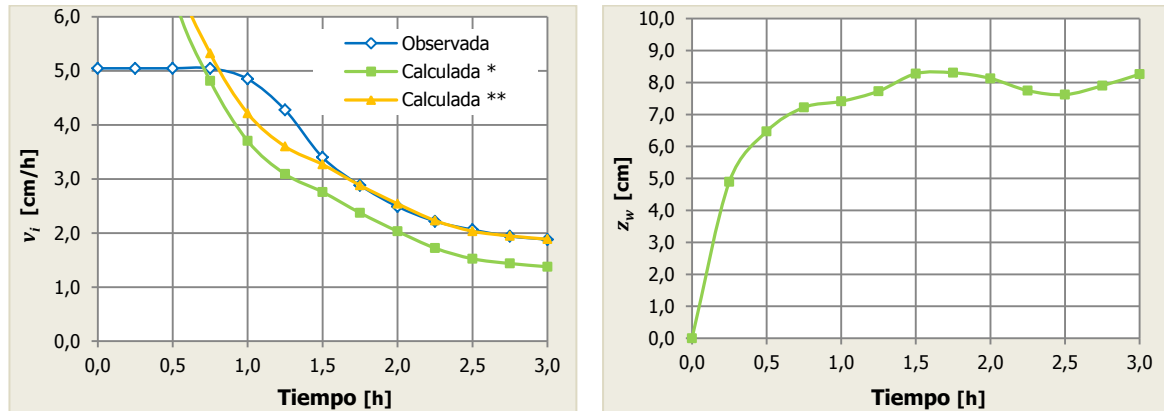


Figura 8. Curvas de infiltración calculadas con la ecuación de Philip para el suelo de Upper Marlboro. (Izquierda) Tasa de infiltración, (Derecha) Infiltración acumulada.

* Valor calculado con $C_p = K_{fs}/3$. ** Valor calculado con $C_p = 2/3 K_{fs} = K_s/3$.

Modelación de la ecuación de Green - Ampt

Con esta ecuación, como ha ocurrido con las anteriores, se puede modelar la tasa de infiltración v_i y la infiltración acumulada z_w . Se trabajará con el período de tiempo total teniendo en cuenta las capas de la Tabla 5. Los cálculos se realizan como se indica en el numeral 2.2.2.1; en este caso será necesario calcular los valores efectivos de: $\Delta\theta_{ef}$, $K_{fs\ ef}$, ψ_{ef} , ponderados como se indica en la ecuación (36). Se usará $K_{fs} = K_s/2$, tomando el valor de K_s de cada capa según la Tabla 5, al igual que los valores de $\Delta\theta$, ψ_s . En las Tablas 13 y 14 y Figura 9 se observan los resultados de la modelación con la ecuación de Green-Ampt.

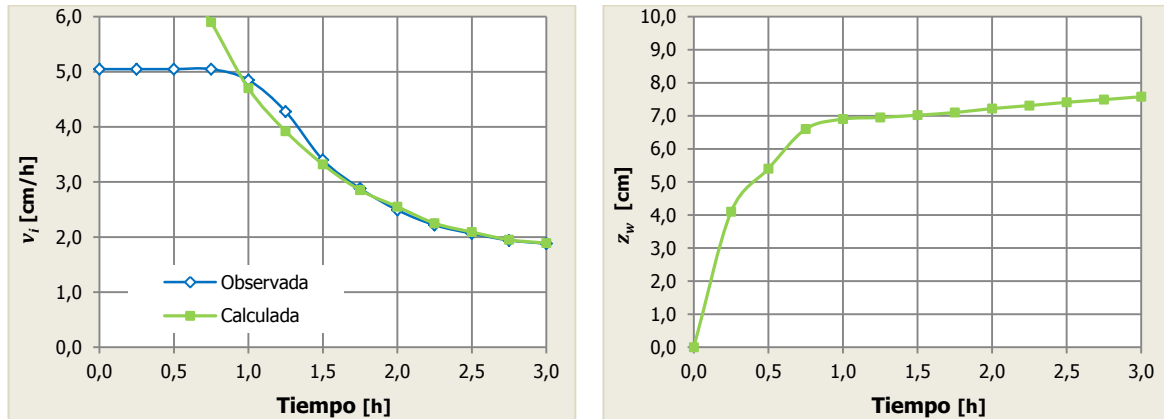
Tabla 13. Cálculo de z_w , t y v_i para la ecuación de Green - Ampt

L_f [cm]	$(\theta_s - \theta)_{ef}$ [cm ³ /cm ³]	z_w [cm]	$K_{fs\ ef}$ [cm/h]	ψ_{ef} [cm]	t [h]	v_i [cm/h]
0	----	0,000	----	----	0,000	----
6	0,202	1,212	11,913	-17,886	0,014	47,427
12	0,196	2,350	9,466	-18,582	0,057	24,125
18	0,186	3,355	7,052	-19,870	0,137	14,837
24	0,181	4,350	5,224	-20,228	0,284	9,627
30	0,178	5,339	4,277	-20,308	0,482	7,172
36	0,175	6,310	4,019	-20,248	0,668	6,279
42	0,164	6,894	3,605	-20,361	0,875	5,352
48	0,144	6,902	3,030	-20,726	1,099	4,338
54	0,132	7,105	2,074	-21,438	1,714	2,898
60	0,123	7,402	1,530	-22,249	2,492	2,097

L_f = profundidad del frente húmedo medido desde superficie.

Tabla 14. Tabulación de los valores de z_w , t y v_i para la ecuación de Green - Ampt

t [h]	0,000	0,250	0,500	0,750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000
v_i [cm/h]	----	10,300	7,000	5,900	4,700	3,920	3,320	2,850	2,550	2,250	2,090	1,950	1,890
z_w [cm]	0,000	4,100	5,400	6,600	6,900	6,950	7,020	7,100	7,220	7,310	7,410	7,490	7,580
L_f [cm]	0,000	22,500	30,100	38,100	41,800	45,500	51,700	53,600	56,000	57,800	59,800	61,200	62,600

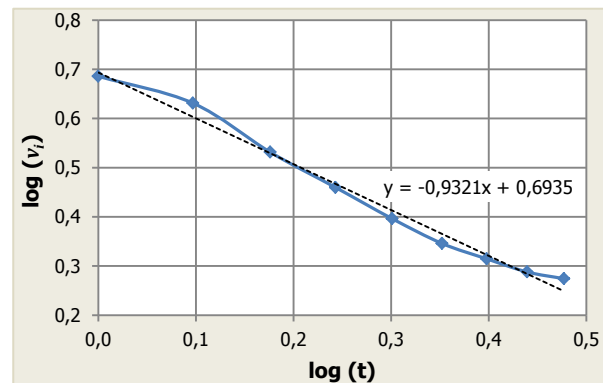
**Figura 9.** Curvas de infiltración calculadas con la ecuación de Green - Ampt para el suelo de Upper Marlboro. (Izquierda) Tasa de infiltración, (Derecha) Infiltración acumulada.

Modelación de la ecuación de Kostiakov

Al igual que con las anteriores ecuaciones, también se modela la infiltración acumulada z_w y la tasa de infiltración v_i . En este caso sólo se tendrá en cuenta desde 1,0 hora para realizar la regresión. Los cálculos se realizan como se indica en el numeral 2.2.2.2, se deberá hallar el valor de α y K_k . La Tabla 15 muestra los cálculos para el modelo de Kostiakov.

Tabla 15. Cálculo de los parámetros de Kostiakov (Upper Marlboro)

t [h]	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
v_i [cm/h]	5,048	5,048	5,048	5,048	4,850	4,277	3,400	2,882	2,490	2,217	2,063	1,940	1,880
$\log t$	----	-0,602	-0,301	-0,125	0,000	0,097	0,176	0,243	0,301	0,352	0,398	0,439	0,477
$\log v_i$	0,703	0,703	0,703	0,703	0,686	0,631	0,531	0,460	0,396	0,346	0,314	0,288	0,274

**Figura 10.** Curva $\log(v_i) - \log(t)$, ecuación de Kostiakov.

Tomando en cuenta las Figura 10, se han determinado los siguientes valores:

$$\alpha = -0,9321 \quad K_k = 4,937$$

En la Tabla 16 y Figura 11 se observan los resultados de la modelación del suelo con la ecuación de Kostiakov.

Tabla 16. Cálculo de v_i y z_w con la ecuación de Kostiakov

t [h]	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
v_i [cm/h]	----	17,973	9,420	6,456	4,937	4,010	3,384	2,931	2,588	2,319	2,102	1,923	1,773
z_w [cm]	----	66,077	69,266	71,203	72,609	73,719	74,639	75,425	76,113	76,725	77,277	77,780	78,241

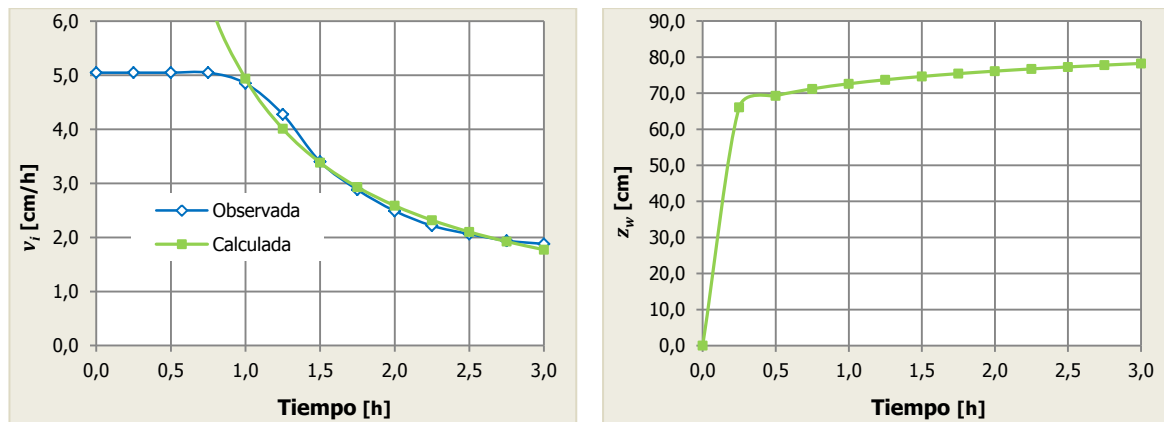


Figura 11. Curvas de infiltración calculadas con la ecuación de Kostiakov para el suelo de Upper Marlboro. (Izquierda) Tasa de infiltración, (Derecha) Infiltración acumulada.

Modelación de la ecuación de Holtan

Se modelará la tasa de infiltración v_i y la infiltración acumulada z_w . Se trabajará con el período de tiempo total teniendo en cuenta las capas de la Tabla 5. Los cálculos se realizan como se indica en el numeral 2.2.2.3, hallando F_p para 0,0 horas, según la ecuación (34a) ($\Delta\theta_{ef} \times 60,0$ cm) y luego para cada tiempo se debe hallar un nuevo F_p , usando la ecuación (34b). Según las Tablas 1 y 2, se toma el valor de $\alpha = 0,30$ cm-cm^{1,4}/h y de $v_{fin} = 0,76$ cm/h, respectivamente. Se tomará $n = 1,4$ atendiendo la recomendación de Holtan. En la Tabla 17 y Figura 12 se pueden observar los resultados de la modelación.

Tabla 17. Cálculo de v_i y z_w con la ecuación de Holtan

t [h]	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
F_p [cm]	7,402	6,165	5,208	4,452	3,846	3,351	2,944	2,604	2,317	2,074	1,866	1,686	1,530
v_i [cm/h]	5,705	4,589	3,783	3,187	2,737	2,391	2,120	1,905	1,733	1,593	1,478	1,383	1,304
z_w [cm]	----	1,147	1,892	2,391	2,737	2,989	3,180	3,334	3,466	3,584	3,696	3,804	3,913

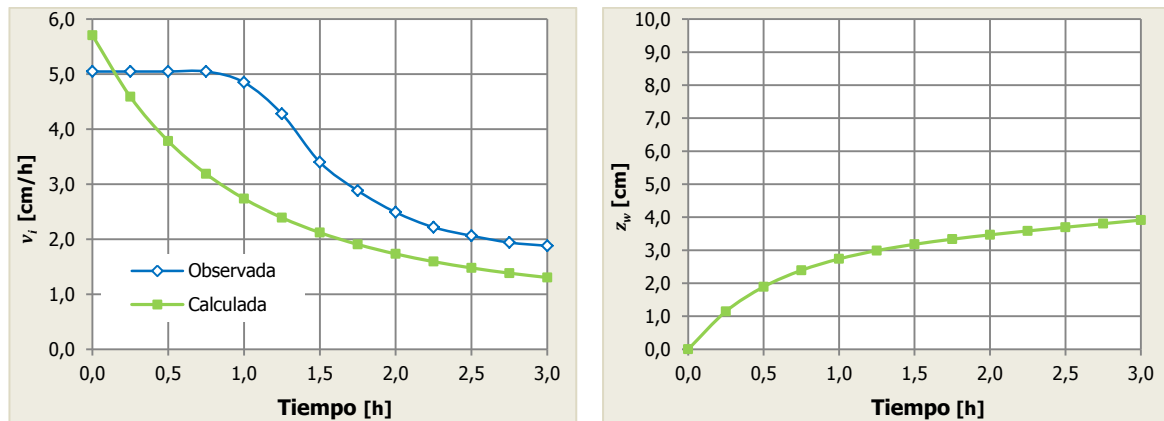


Figura 12. Curvas de infiltración calculadas con la ecuación de Holtan para el suelo de Upper Marlboro. (Izquierda) Tasa de infiltración, (Derecha) Infiltración acumulada.

Modelación la ecuación de Lumb

Con la ecuación de Lumb se modelará la profundidad del frente húmedo L_f medido desde la superficie. Se trabajará con el período de tiempo total teniendo en cuenta los valores efectivos o ponderados de la Tabla 5 ($\Delta\theta_{ef} = 0,123$, $Ks_{ef} = 3,060$ cm/h). Los cálculos se realizan como se indica en el numeral 2.2.2.4 y los resultados se observan en la Tabla 18 y la Figura 13.

Tabla 18. Cálculo de L_f con la ecuación de Lumb

t [h]	0,000	0,250	0,500	0,750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000
L_f [cm]	0,000	6,201	12,401	18,602	24,803	31,004	37,204	43,405	49,606	55,807	62,007	68,208	74,409

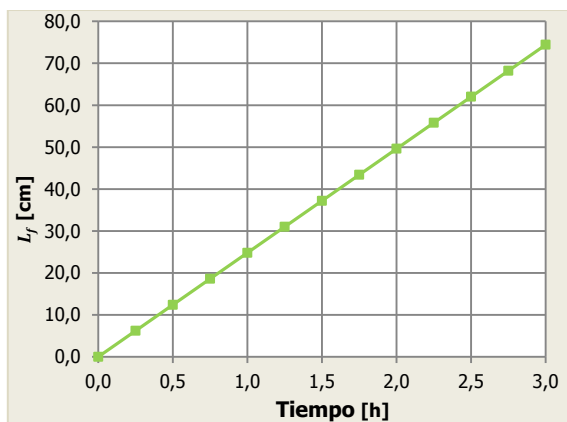


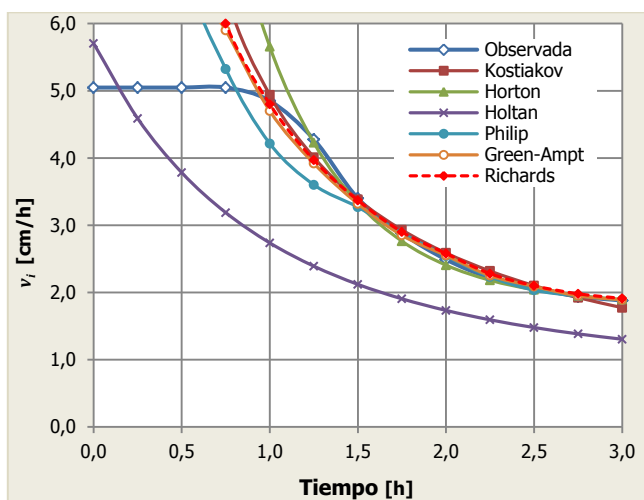
Figura 13. Curva de profundidad del frente húmedo calculada con la ecuación de Lumb, para el suelo de Upper Marlboro.

2.2.5 SÍNTESIS DE LAS ECUACIONES DE INFILTRACIÓN

Retomando los datos de tasa de infiltración v_i e infiltración acumulada z_w , se presenta una síntesis que compara los resultados obtenidos con la modelación de las ecuaciones, en la Tabla 19 y Figuras 14, 15 y 16.

Tabla 19. Síntesis del cálculo de v_i y z_w con 6 ecuaciones de infiltración

t [h]	Kostiakov		Horton		Holtan		Philip		Green-Ampt		Richards	
	v_i [cm/h]	z_w [cm]	v_i [cm/h]	z_w [cm]	v_i [cm/h]	z_w [cm]	v_i [cm/h]	z_w [cm]	v_i [cm/h]	z_w [cm]	v_i [cm/h]	z_w [cm]
0,00	----	----	26,318	0,000	5,705	0,000	----	----	----	----	----	----
0,25	17,973	66,077	17,240	5,358	4,589	1,147	10,298	4,894	10,300	4,100	14,000	4,40
0,50	9,420	69,266	11,523	8,898	3,783	1,892	6,980	6,470	7,000	5,400	8,000	5,60
0,75	6,456	71,203	7,923	11,294	3,187	2,391	5,325	7,222	5,900	6,600	6,000	6,70
1,00	4,937	72,609	5,656	12,970	2,737	2,737	4,216	7,411	4,700	6,900	4,800	6,94
1,25	4,010	73,719	4,228	14,192	2,391	2,989	3,602	7,729	3,920	6,950	3,970	6,97
1,50	3,384	74,639	3,329	15,128	2,120	3,180	3,269	8,278	3,320	7,020	3,370	7,04
1,75	2,931	75,425	2,763	15,884	1,905	3,334	2,883	8,305	2,850	7,100	2,900	7,08
2,00	2,588	76,113	2,406	16,526	1,733	3,466	2,542	8,129	2,550	7,220	2,580	7,19
2,25	2,319	76,725	2,182	17,098	1,593	3,584	2,232	7,748	2,250	7,310	2,280	7,27
2,50	2,102	77,277	2,040	17,624	1,478	3,696	2,034	7,622	2,090	7,410	2,100	7,38
2,75	1,923	77,780	1,951	18,122	1,383	3,804	1,947	7,902	1,950	7,490	1,980	7,44
3,00	1,773	78,241	1,895	18,603	1,304	3,913	1,887	8,261	1,890	7,580	1,910	7,52

**Figura 14.** Curvas de tasa de infiltración v_i , calculadas con 6 ecuaciones para el suelo de Upper Marlboro.

La profundidad del frente húmedo L_f se ha modelado con la ecuación de Lumb, mientras que las ecuaciones de Philip y Green – Ampt han usado L_f para hallar otros parámetros. La Tabla 20 y la Figura 17 muestran una comparación de L_f para las tres ecuaciones.

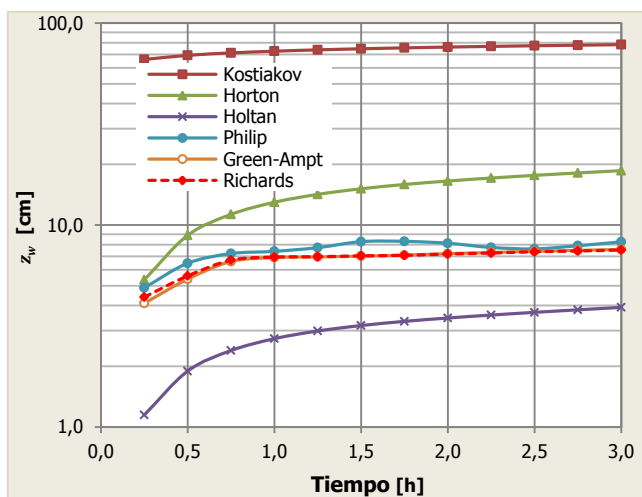


Figura 15. Curvas de infiltración acumulada z_w , calculadas con 6 ecuaciones para el suelo de Upper Marlboro.

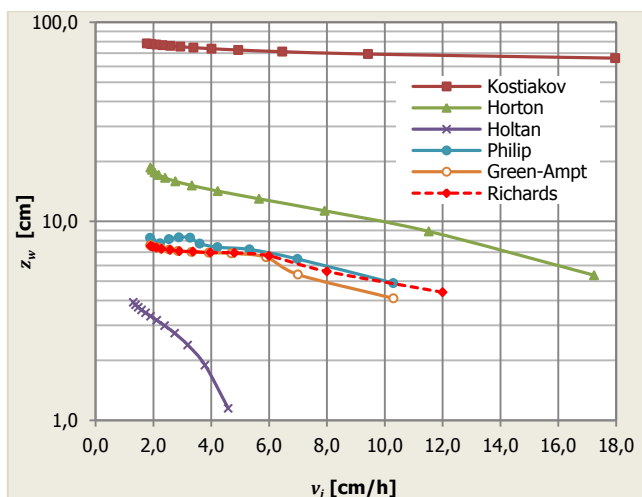


Figura 16. Curvas de infiltración acumulada z_w , vs tasa de infiltración v_i , calculadas con 6 ecuaciones para el suelo de Upper Marlboro.

Tabla 20. Valores de L_f , suelo de Upper Marlboro

t [h]	0,000	0,250	0,500	0,750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500	2,750	3,000
L_f^* [cm]	0,000	6,201	12,401	18,602	24,803	31,004	37,204	43,405	49,606	55,807	62,007	68,208	74,409
L_f^{**} [cm]	0,000	6,157	12,315	18,472	24,630	30,787	36,944	43,102	49,259	55,417	61,574	67,732	73,889
L_f^{***} [cm]	0,000	22,500	30,100	38,100	41,800	45,500	51,700	53,600	56,000	57,800	59,800	61,200	62,600

* Lumb, ** Philip, *** Green - Ampt

Tomando en cuenta la modelación del suelo de Upper Marlboro efectuada con la ecuación de Richards por medio del software Hydrus ®, se tienen gráficas que representan la variación del contenido volumétrico de agua θ y la cabeza de presión (negativa) ψ , respecto del tiempo t y de la profundidad z (Figura 18), tomando los valores de la Tabla 7. Así mismo, el suelo de Upper Marlboro se ha modelado con Hydrus ® variando el contenido volumétrico de agua inicial θ_i y la cabeza de presión (negativa o succión) ψ , ponderando los valores como se indica en la Tabla 21. Los resultados obtenidos con la modelación se presentan en gráficas variando el contenido volumétrico de agua θ y de la cabeza de presión (negativa o succión) ψ , respecto del tiempo t y de la profundidad z , como se pueden observar en la Figura 19.

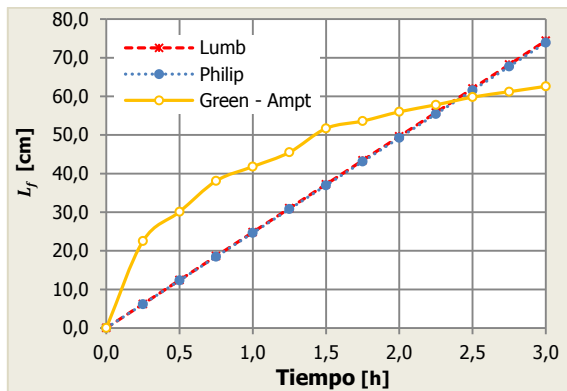


Figura 17. Curvas L_f - tiempo, para el suelo de Upper Marlboro.

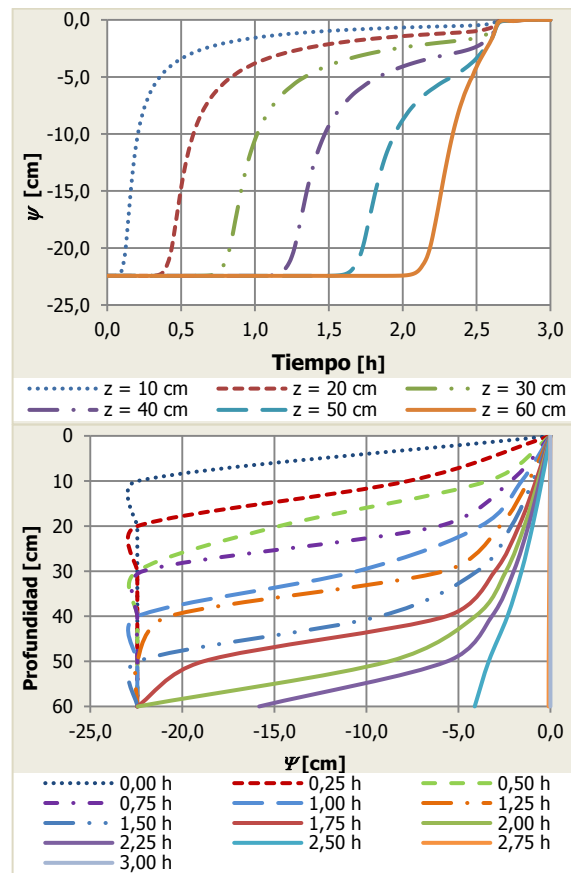
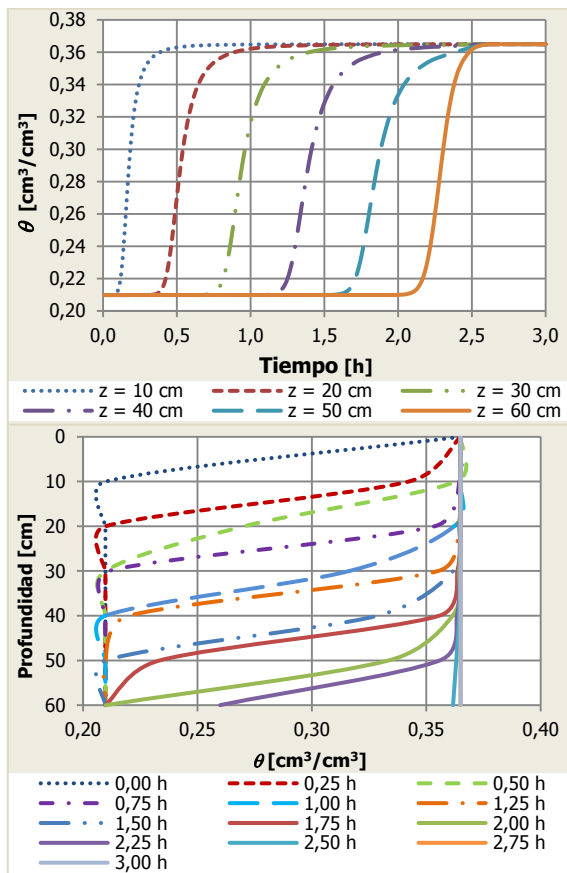


Figura 18. (Izquierda superior) variación de θ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (derecha superior) variación de ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (izquierda inferior) variación de z con θ a diferentes tiempos t , (derecha inferior) variación de z con ψ a diferentes tiempos t , modelación realizada con los datos de la Tabla 7, para el suelo de Upper Marlboro.

Tomando los valores de la Tabla 5 pero sin ponderar, nuevamente se ha modelado el suelo de Upper Marlboro con Hydrus ®; los resultados obtenidos con la modelación se presentan en gráficas variando el contenido volumétrico de agua θ y de la cabeza de presión (negativa) ψ , respecto del tiempo t y de la profundidad z , como se pueden observar en la Figura 20.

Tabla 21. Parámetros ponderados, ecuación de Richards

L_f [cm]	θ_i [cm ³ /cm ³]	θ_s [cm ³ /cm ³]	θ_r [cm ³ /cm ³]	ψ [cm]	K_s [cm/h]	α	n
0	----	----	----	----	----	----	----
6	0,22	0,365	0,136	-20,33	3,06	0,072	3,094
12	0,21			-22,81			
18	0,19			-27,71			
24	0,18			-30,00			
30	0,18			-31,56			
36	0,18			-30,37			
42	0,18			-28,63			
48	0,19			-25,81			
54	0,20			-23,99			
60	0,21			-22,44			

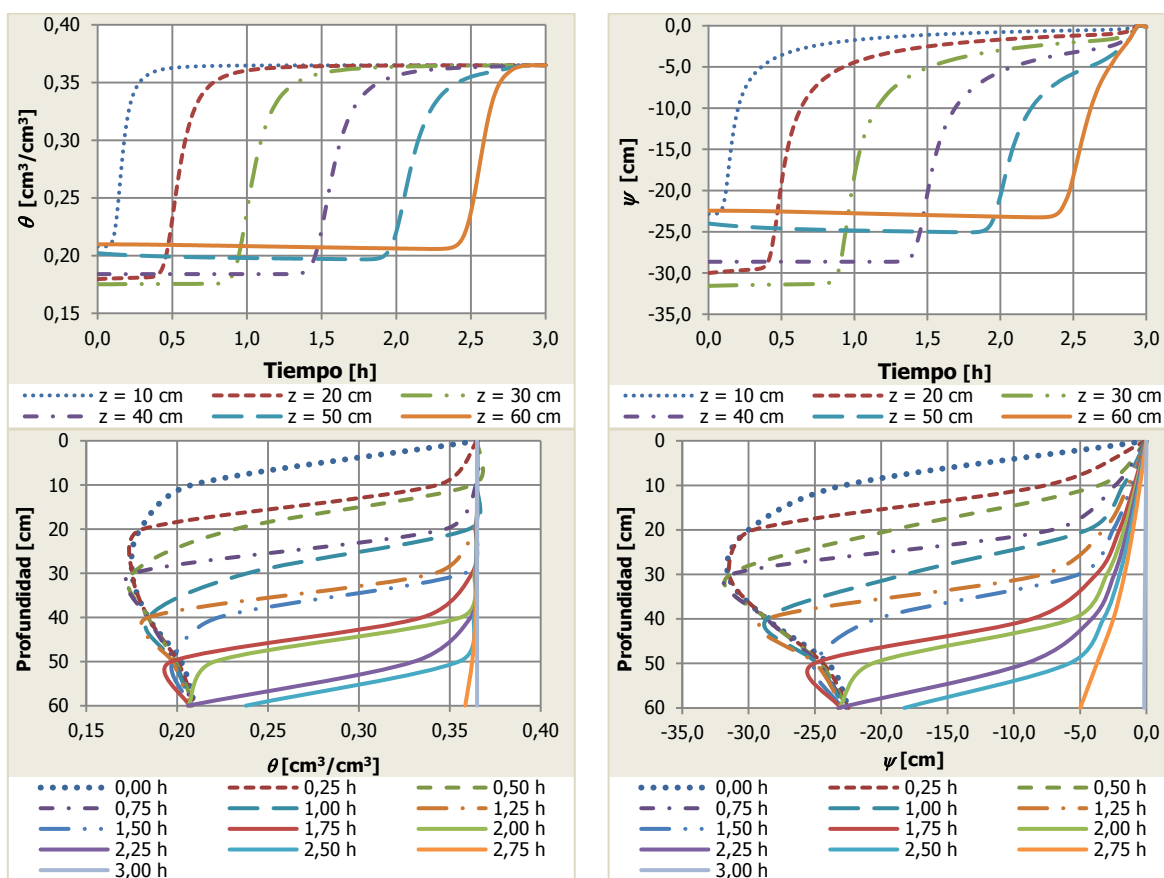


Figura 19. (Izquierda superior) variación de θ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (derecha superior) variación de ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (izquierda inferior) variación de z con θ a diferentes tiempos t , (derecha inferior) variación de z con ψ a diferentes tiempos t , modelación realizada con los datos de la Tabla 21, para el suelo de Upper Marlboro.

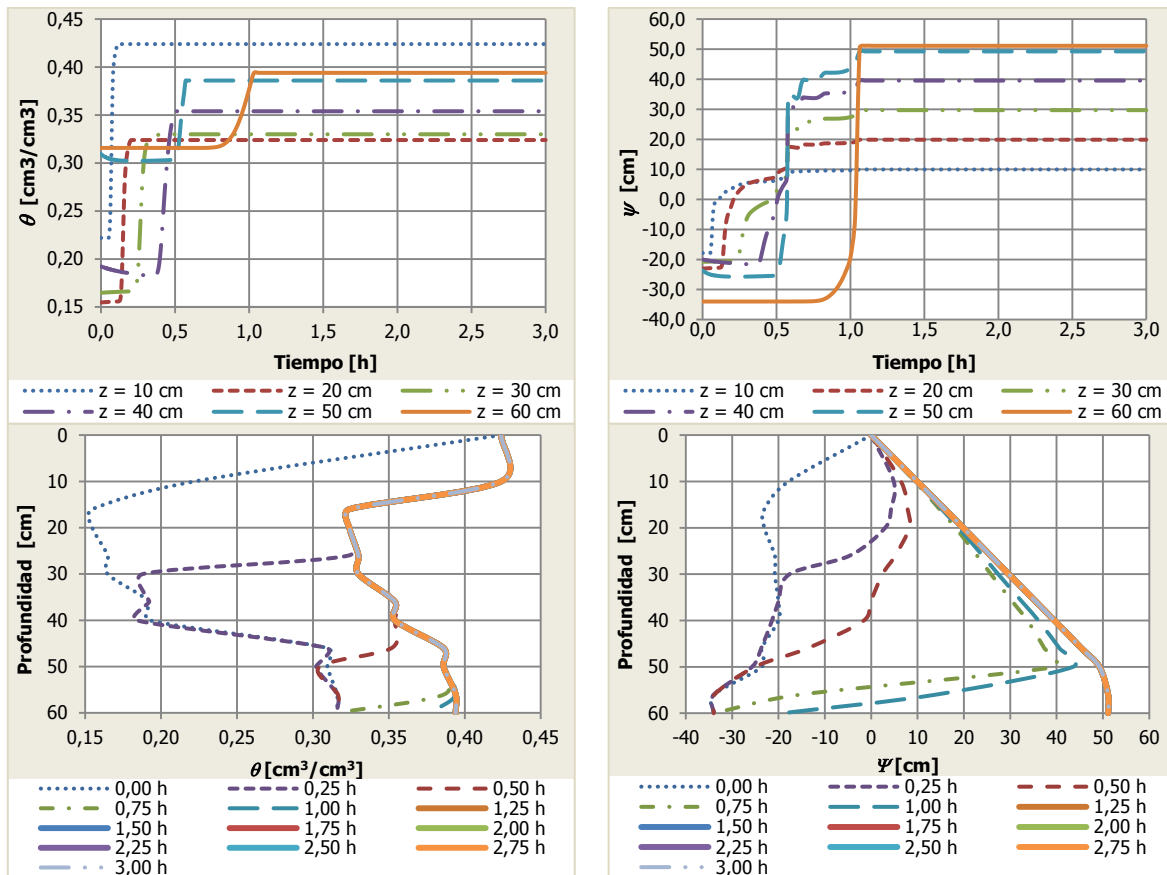


Figura 20. (Izquierda superior) variación de θ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (derecha superior) variación de ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (izquierda inferior) variación de z con θ a diferentes tiempos t , (derecha inferior) variación de z con ψ a diferentes tiempos t , modelación realizada con los datos de la Tabla 5, para el suelo de Upper Marlboro.

COMENTARIOS AL EJERCICIO DE APLICACIÓN

Luego de aplicar las ecuaciones de infiltración citadas en los numerales anteriores, se relacionan algunos comentarios que evidencian la modelación de la infiltración del agua dentro del suelo y que determinarán la mejor opción para completar los objetivos del presente trabajo.

- La ecuación de Green – Ampt y la de Richards, son las que mejor representan la infiltración en el suelo, en especial esta última modela muy aproximadamente el recorrido del agua dentro del mismo sin mediciones en campo, sólo con los parámetros que caracterizan cada modelo. La ecuación de Green – Ampt resulta más sencilla de trabajar que la de Richards si se programa su algoritmo, inclusive con una sencilla hoja de cálculo puesto que entrega buenos resultados con menos complejidad que la ecuación de Richards en 1-D. Cuando se trata de 2-D y 3-D, la ecuación de Richards es la herramienta principal para modelar la infiltración, por lo que se debe contar con el software apropiado.

- La ecuación de Philip, aunque muestra cierto grado de certeza en la predicción de la infiltración, presenta subjetividad a la hora de elegir el parámetro C_p , porque este dependerá de la forma en que las curvas de Philip se acomoden mejor a las curvas medidas en campo, implicando medir previamente lo que se quiere predecir, debiendo acomodar parámetros para obtener el resultado, mientras que los modelos de Richards y Green – Ampt no requieren de esto para lograrlo.
- Las ecuaciones de Kostiakov y Horton representan en buena forma la infiltración en el suelo, pero previamente se debe realizar las mediciones de infiltración en terreno para efectuar las regresiones matemáticas respectivas. Además las ecuaciones de Kostiakov, Horton y Holtan no incluyen parámetros del suelo como θ , K_s y ψ que finalmente son los relevantes a la hora de evaluar la resistencia del suelo frente a determinadas situaciones.
- La ecuación de Holtan es la que menos se acomoda al comportamiento real del suelo, según lo observado en el ejercicio comparativo. Existe subjetividad en la elección de los parámetros, por lo que puede representar bien o no el comportamiento del suelo, dependiendo de quien realiza los cálculos y la elección de parámetros. Seguramente resulta acertada en algunos casos y su aplicación puede ser apropiada en los mismos, pero su versatilidad y aplicabilidad general no ha mostrado buenos resultados para este caso.
- La ecuación de Lumb no tiene en cuenta las presiones en los poros de los suelos, lo que la envía a un segundo plano a la hora de evaluar cambios en la resistencia del suelo y otras propiedades relacionadas; pero, si se combina con otras teorías y ecuaciones se pueden lograr resultados interesantes, como lo afirman Nq y Shi (1998) y Kim et al. (2004) quienes modelan la infiltración en taludes y la variación en la resistencia de los mismos.
- La infiltración acumulada z_w ha tenido resultados diferentes, comparando entre sí las teorías aplicadas. Solamente las teorías de Richards, Green – Ampt y Philip muestran similitud en sus resultados; no obstante la ecuación de Philip presenta inconsistencias en la magnitud de z_w con la progresión del tiempo, lo que no ofrece garantías para su aplicación.
- En la Figura 18, cuyos parámetros corresponden a la Tabla 7, se observa que el aumento de θ y ψ se produce de forma similar a cualquier profundidad. Al final de la modelación, los valores de θ y ψ , sin importar la profundidad alcanzan el mismo valor máximo. En este caso fue necesario 2,7 h para alcanzar los máximos θ y ψ en la totalidad del suelo.
- La Figura 19, derivada de la Tabla 21, muestra el incremento de θ y ψ en forma similar que los mostrados en la Figura 18, inclusive comenzando con valores iniciales diferentes de θ y ψ para cada profundidad. En este caso, los valores máximos de θ y ψ se alcanzaron luego de 2,9 h, debido a los valores iniciales menores que en el caso anterior.

- La Figura 20, cuya modelación se realizó con los datos de la Tabla 5, muestra heterogeneidad total en θ y ψ . Debido a que cada capa cuenta con parámetros diferentes, cada capa alcanza los valores máximos de θ y ψ a diferentes tiempos, siendo el máximo 1,1 h, a una profundidad de 60 cm. En las figuras 18 y 19 el máximo ψ fue cero, pero en este caso se logran valores hasta de 51 cm para ψ , alcanzando valores hidrostáticos a medida que se avanza en profundidad.
- Como se aprecia en las Figuras 18 a 20, las condiciones iniciales y condiciones de frontera en las modelaciones de infiltración direccionan el resultado, reflejando o no el comportamiento real del suelo. Las Figuras 18 y 19 muestran un comportamiento homogéneo del suelo, ya que se han ponderado varios de los parámetros para la modelación de la infiltración, siguiendo la metodología original del trabajo de Turner (2006).
- Comparando las Figuras 18 y 19, se observa un comportamiento muy similar para θ y ψ . En la Figura 19 se observa que una vez todas las capas alcanzan los mismos valores de θ y ψ , se comportan de la misma forma que los valores de la Figura 18; inclusive si las dos modelaciones hubieran alcanzado los máximos θ y ψ en los mismos tiempos, se hubieran podido superponer una encima de la otra, encontrando diferencias solo en los valores iniciales de θ y ψ . De lo anterior se pudo observar que sin importar los valores iniciales, considerando parámetros homogéneos para todo el espesor de suelo, se obtendrá el mismo comportamiento sin importar su profundidad, debido a que el suelo siempre tiende a llegar a los máximos θ y ψ de la misma forma.
- Comparando las Figuras 19 y 20 se evidencian comportamientos diferentes, debido a que el suelo llegó a sus máximos valores de θ y ψ dependiendo de los parámetros de cada capa, sin importar los valores iniciales; si todas las capas tienen los mismos parámetros, los valores máximos de θ y ψ se obtienen a intervalos de tiempo similares, pero si los parámetros de las capas son diferentes, estas llegan a los valores de θ y ψ máximos de cada capa a intervalos de tiempo diferentes. En este caso los valores iniciales de θ y ψ no mostraron mucha influencia en los resultados, solo la ponderación de parámetros los influenció a gran escala, puesto que los intervalos de tiempo en la variación de propiedades en cada capa cambian sustancialmente; inclusive los tiempos totales en los cuales se alcanzan los valores máximos en cada modelación también sufren grandes cambios.
- De las observaciones realizadas en las Figuras 18, 19 y 20, se sintetiza que la ponderación de parámetros distorsiona los resultados del tiempo para θ y ψ en los suelos, siendo los valores iniciales de θ y ψ los parámetros menos influenciados, según las modelaciones realizadas.
- La Figura 20 muestra un comportamiento heterogéneo, en parte debido a la variación de propiedades y parámetros de los diferentes estratos, pero causado

principalmente por los contrastes de las 6 permeabilidades y en especial a que el estrato subyacente siempre tendrá una columna de agua conectada a la atmósfera, ya que la capa superior al tener mayor permeabilidad se saturará más rápido, incrementando de igual forma la presión de poros y causará un efecto similar al que se produce si en vez de suelo saturado sólo existe la columna de agua.

- En general, el ejercicio ha permitido comprobar que Hydrus ® puede ser usado para modelar confiablemente la infiltración dentro del suelo. Así mismo, la teoría de Green – Ampt ofrece confiabilidad para modelaciones en 1-D cuando resulta muy dispendioso trabajar o programar la teoría de Richards.

2.3 ALGUNAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS

Los suelos parcialmente saturados cuentan con propiedades que marcan su comportamiento dependiendo de la cantidad de agua presente; dentro de estas propiedades, se destacan tres: la curva característica suelo-agua (SWCC), el coeficiente de conductividad hidráulica o permeabilidad y la resistencia al corte.

2.3.1 CURVA CARACTERÍSTICA SUELO-AGUA (SWCC)

La SWCC cobra gran importancia en el estudio de los suelos parcialmente saturados, debido a que relaciona el contenido volumétrico de agua con la succión presente en el suelo (ver Figura 21); también se puede estimar parámetros de funciones como la permeabilidad y establecer parámetros de esfuerzos al corte. Un aspecto relevante de la SWCC es que ésta se puede estimar con datos emanados de ensayos de laboratorio siguiendo procedimientos descritos por diferentes autores.

Otra forma de construir la SWCC es usar las funciones de pedotransferencia, trabajando con códigos como los de SOILPAR elaborado por Acutis y Donatelli (2003) y ROSETTA elaborado por Schaap et al. (1999); las funciones de pedotransferencia se basan en ajustes de composición textural, densidad aparente y en uno o dos puntos de la SWCC. El código ROSETTA se ha popularizado en los últimos años y aunque tiene detractores que argumentan su poca efectividad a la hora de estimar la SWCC, también cuenta con autores que han aprobado su uso debido a los buenos resultados obtenidos, e inclusive el software ROSETTA ® elaborado por Schaap en el United States Salinity Laboratory (USDA) en Riverside – California, supervisado por Leij y Van Genuchten. ROSETTA ® puede obtenerse gratuitamente en la website: <http://www.cals.arizona.edu/research/rosetta/index.html> (Universidad de Arizona) o <http://www.ussl.ars.usda.gov>. Adicional a los modelos de Van Genuchten (1980), Brooks y Corey (1964) y Kosugi (1996), el software Hydrus ® incluye como cuarta opción para la estimación de parámetros para la SWCC, el uso de redes neuronales trabajando con una versión liviana de ROSETTA ®.

Fredlund (2006) presenta 12 ecuaciones calificadas como las de mejor ajuste de datos para la SWCC, de las cuales serán presentadas 2 como las más populares y las más

usadas en diversos software de simulación en 2-D y 3-D para trabajar con medios parcialmente saturados.

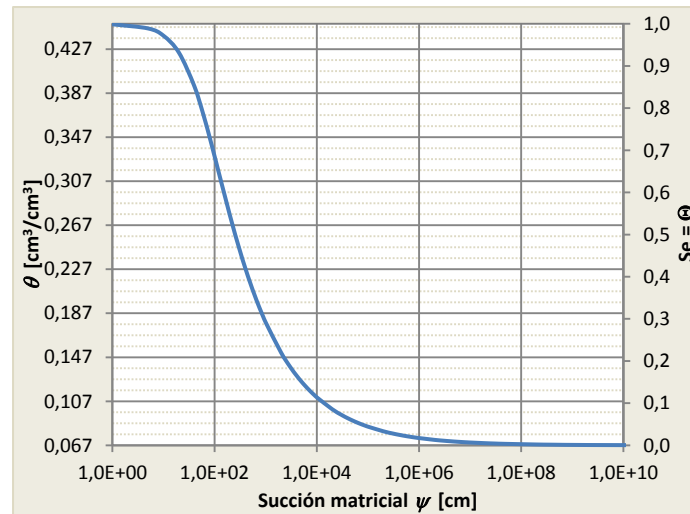


Figura 21. Curva característica suelo-agua (SWCC) para un suelo de textura *Franco limoso*.

2.3.1.1 Contenido volumétrico de agua (θ)

Según lo definen Chow et al. (1994), la porosidad del suelo η es el cociente entre el volumen de vacíos y el volumen total de suelo: $\eta = \frac{\text{Volumen vacíos}}{\text{Volumen total}}$ (40) y su valor depende de la textura del mismo. Dentro del suelo, una parte de vacíos está ocupada por agua y el resto lo ocupa el aire; el volumen ocupado por agua se mide usando el contenido volumétrico de agua θ , definido como el cociente entre el volumen de agua y el volumen total del suelo:

$$\theta = \frac{\text{Volumen agua}}{\text{Volumen total}} \quad (41)$$

Si el suelo se encuentra saturado, $\theta = \theta_s = \eta$ se denomina contenido volumétrico de agua saturado. θ_r se denomina al contenido volumétrico residual de agua que persiste en el suelo después de haberse drenado completamente. El contenido volumétrico inicial de agua θ_i será el que se encuentra en el suelo en un instante de tiempo dado.

La saturación efectiva S_e o contenido volumétrico normalizado de agua Θ será el cociente entre el contenido volumétrico de agua disponible en un instante de tiempo ($\theta_i - \theta_r$) y el contenido volumétrico de agua máximo disponible o porosidad efectiva ($\theta_e = \theta_s - \theta_r$).

$$S_e = \Theta = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (42)$$

Θ estará entre $0 \leq \Theta \leq 1,0$ siempre que $\theta_r \leq \theta_i \leq \theta_s$.

2.3.1.2 Ecuación de Van Genuchten

Van Genuchten (1980) presenta una expresión basada en el modelo de Mualem, por medio de la cual se construye la SWCC en el plano $\theta - \psi$.

$$S_e = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \Theta = \left(\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right)^m \quad (43) \quad m = 1 - 1/n \quad (44)$$

ψ = cabeza de presión, que en este caso será la succión matricial ($u_a - u_w$) para cada contenido volumétrico de agua (se toma en valor absoluto), α = parámetro del suelo que es función del valor de entrada de aire del suelo, n = parámetro del suelo que es función de la tasa de extracción de agua una vez el valor de entrada de aire se ha excedido, m = parámetro del suelo que es función del contenido residual de agua.

2.3.1.3 Ecuación de Fredlund y Xing

Fredlund y Xing (1994) presentan una ecuación por medio de la cual se puede construir la curva SWCC en el plano $\theta - \psi$.

$$S_e = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \Theta = \left(\frac{1}{\ln(e + (\psi/\alpha)^n)} \right)^m \quad (45)$$

ψ = cabeza de presión, que en este caso será la succión matricial ($u_a - u_w$) para cada contenido volumétrico de agua (se toma en valor absoluto), α = parámetro del suelo que es función del valor de entrada de aire del suelo, n = parámetro del suelo que es función de la tasa de extracción de agua una vez el valor de entrada de aire se ha excedido que controla la pendiente de la SWCC, m = parámetro del suelo que es función del contenido residual de agua.

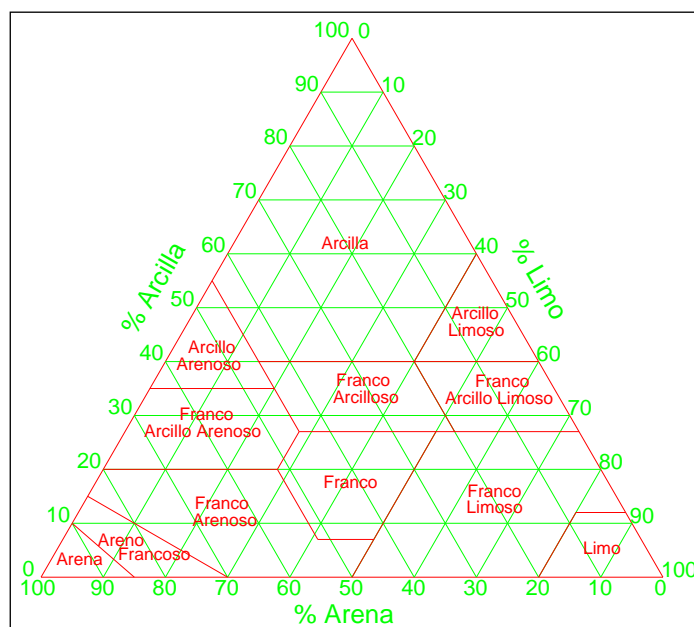
2.3.1.4 Comparación de la SWCC a partir de las ecuaciones de Van Genuchten y Fredlund y Xing

En Tabla 22 y Figura 22 se observan 12 diferentes texturas de suelos tomando en cuenta el triángulo textural de suelos de la USDA (EE UU), apreciando 5 parámetros que caracterizan cada textura de suelo. Como un ejercicio de comparación de las ecuaciones descritas en los dos numerales anteriores, se tomará el suelo denominado "Franco arcilloso" para graficar la curva resultante de cada ecuación.

Los parámetros usados para construir la curva con la ecuación de Van Genuchten corresponden con la Tabla 22 y se realizó el procedimiento descrito por Van Genuchten (1980), mientras que los parámetros para construir la curva con la ecuación de Fredlund y Xing se hallaron con el procedimiento consignado por Fredlund y Xing (1994). La Tabla 23 muestra los parámetros para cada ecuación y la Figura 23 muestra las curvas halladas.

Tabla 22. Parámetros hidráulicos de 12 texturas de suelos para trabajar con Van Genuchten (1980) (Adoptado de Šimůnek, 2007)

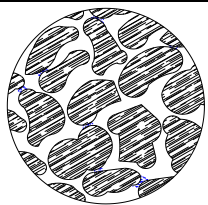
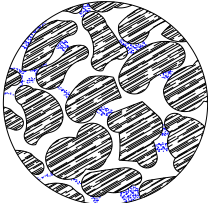
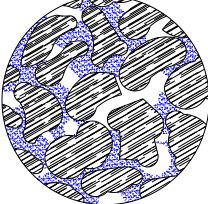
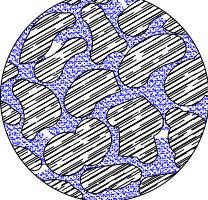
	Textura	θ_r [cm ³ /cm ³]	θ_s [cm ³ /cm ³]	α [1/cm]	n	Ks [cm/día]
1	Arena	0,045	0,430	0,145	2,68	712,80
2	Areno francoso	0,057	0,410	0,124	2,28	350,20
3	Franco arenoso	0,065	0,410	0,075	1,89	106,10
4	Franco	0,078	0,430	0,036	1,56	24,96
5	Limo	0,034	0,460	0,016	1,37	6,00
6	Franco limoso	0,067	0,450	0,020	1,41	10,80
7	Franco areno-arcilloso	0,100	0,390	0,059	1,48	31,44
8	Franco arcilloso	0,095	0,410	0,019	1,31	6,24
9	Franco limo-arcilloso	0,089	0,430	0,010	1,23	1,68
10	Arcilla arenosa	0,100	0,380	0,027	1,23	2,88
11	Arcilla limosa	0,070	0,360	0,005	1,09	0,48
12	Arcilla	0,068	0,380	0,008	1,09	4,80

**Figura 22.** Triángulo de Suelos de la USDA (EE UU) (Adaptado de Šimůnek, 2007 y USDA, 2007)**Tabla 23.** Parámetros hidráulicos para la construcción de SWCC

VAN GENUCHTEN					FREDLUND Y XING				
θ_r	θ_s	n	α	m	θ_r	θ_s	n	α	m
0,410	0,095	1,31	0,019	0,237	0,410	0,095	1,05	110,0	1,026

Chenggang (2006) realizando observaciones en el microscopio, describe 4 fases o etapas del suelo con base en la ocupación del aire en los poros. En la Tabla 24 se muestran las 4 etapas mencionadas, según lo reportado por Chenggang (2006), procurando explicar cómo actúa el aire a medida que el suelo se satura con agua. En la Figura 23 se ubican de forma aproximada estas fases en la SWCC.

Tabla 24. Diferentes patrones de la fase de aire en suelos parcialmente saturados (Adaptado de Chenggang, 2006)

Fase o etapa		Descripción
A		Fase completamente continua. El agua sólo existe en pequeños vacíos. El agua contenida no está necesariamente interconectada. Las fases de aire son continuas en el suelo y se encuentran conectadas con la atmósfera.
		Fase parcialmente continua. El agua ocupa gradualmente todos los pequeños poros y espacios, con relaciones hidráulicas establecidas en algunos sitios. El aire se acumula en los grandes vacíos y todavía se conecta con la atmósfera.
		Fase internamente continua. El agua ha comenzado a acumularse en grandes volúmenes y sella los espacios de la frontera del suelo. El aire atrapado no se encuentra conectado con la atmósfera, pero dentro de la masa de suelo todavía hay sitios donde se encuentra interconectado.
		Fase completamente sellada. El agua contiene burbujas de aire ocluidas, en toda la masa de suelo. El aire sólo aparece en forma de burbujas ocluidas en el agua y se mueven con ella.

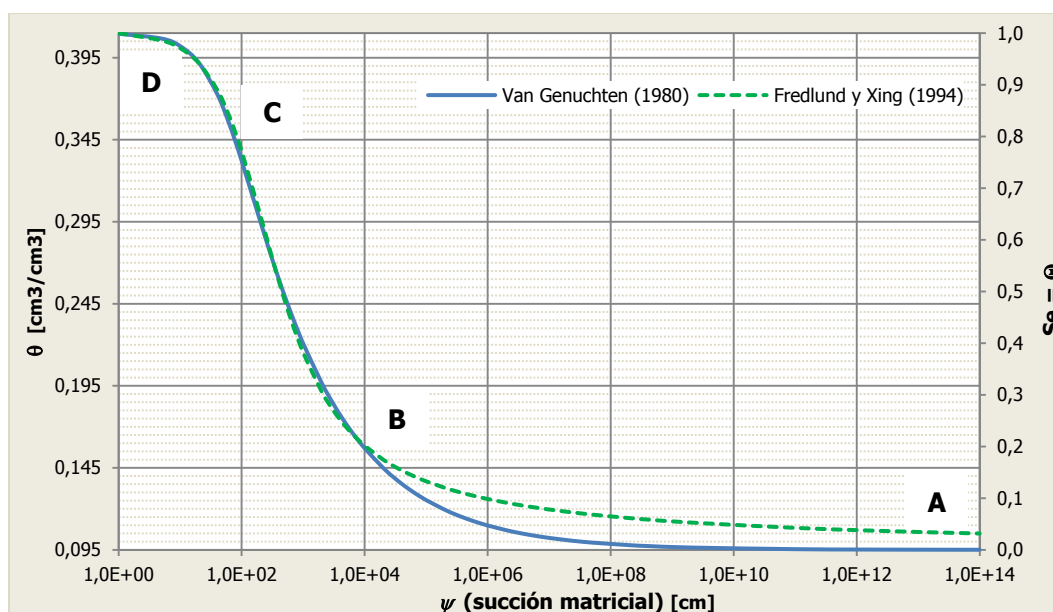


Figura 23. Curva característica suelo-agua (SWCC) para un suelo de textura *Franco arcilloso*, según los parámetros de la Tabla 23, comparando las curvas halladas con las expresiones de Van Genuchten (1980) y Fredlund y Xing (1994).

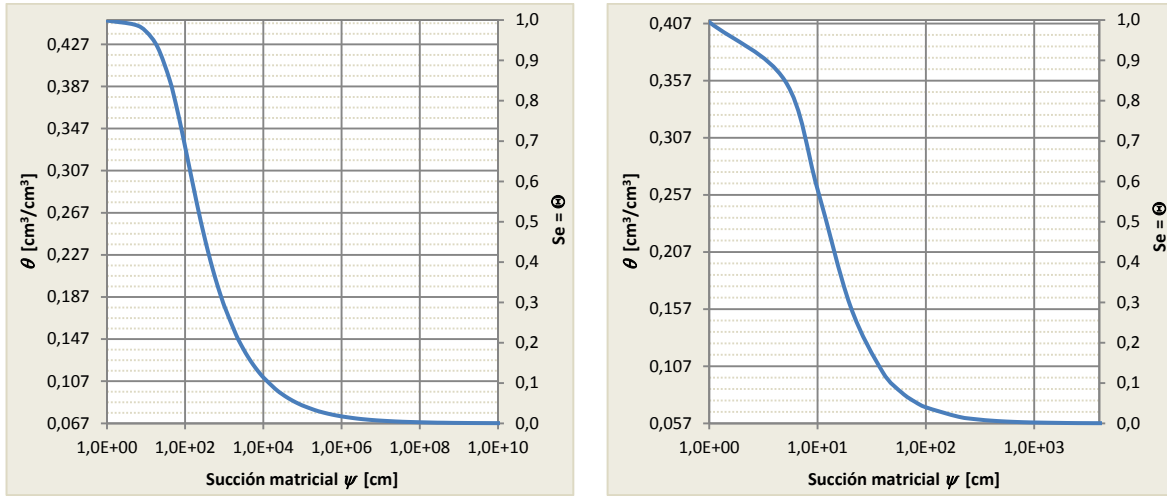


Figura 24. Curva característica suelo-agua (SWCC) para un suelo de textura *Franco limoso* (Izquierda) y *Areno francoso* (derecha) según los parámetros de la Tabla 23.

En la Figura 23 se puede observar diferencia entre las dos curvas en la parte inferior, pero en general las dos concuerdan en todo su desarrollo. En la Figura 24 se observan las curvas SWCC para las texturas: *Franco limoso* y *Areno francoso*, según la Tabla 22, las cuales muestran rangos de ψ diferentes. La ecuación que se usará en este trabajo es la ecuación de Van Genuchten, puesto que es la que desarrolla el software Hydrus ® y resulta ser la menos laboriosa para la construcción de la curva.

2.3.2 COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Diferentes ecuaciones para estimar la función de conductividad hidráulica se han desarrollado a partir de procedimientos matemáticos, describiendo la variación de la conductividad hidráulica con la succión del suelo o el contenido volumétrico de agua. Fredlund (2006) presenta diferentes ecuaciones para estimar la conductividad hidráulica, pero al igual que el numeral anterior se trabajará con la ecuación de Van Genuchten (1980) siguiendo el modelo de Mualem, que se presenta a continuación:

$$K_r(\psi) = \frac{[1 - (\alpha\psi)^{n-1}(1 + (\alpha\psi)^n)^{-m}]^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{m/2}} \quad (46) \quad m = 1 - 1/n \quad (44)$$

$K_r(\psi)$ = Conductividad hidráulica relativa. Los demás parámetros se describen igual que en el numeral 2.3.1.2.

Como aplicación de la ecuación de Van Genuchten, se construirá una curva en el plano succión matricial ψ – conductividad hidráulica K , para un suelo de textura *Franco arcilloso*, con los parámetros que se indican en la Tabla 22.

En la Figura 25 se puede observar la disminución de la conductividad hidráulica con el aumento de la succión matricial; luego de una succión matricial mayor de 100 cm la disminución de la permeabilidad se vuelve aproximadamente lineal con el aumento de la

succión. En la Figura 26 se observan las curvas en el plano succión matricial ψ – conductividad hidráulica K , para suelos de textura: *Franco limoso* y *Areno francoso*.

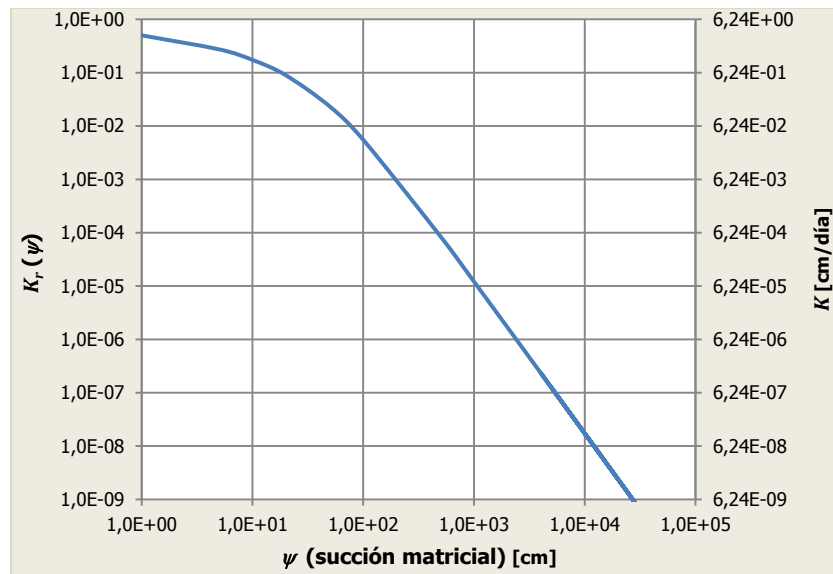


Figura 25. Curva succión matricial – K , para un suelo de textura *Franco arcilloso*, complementando la Figura 23, calculada con la ecuación de Van Genuchten (1980).

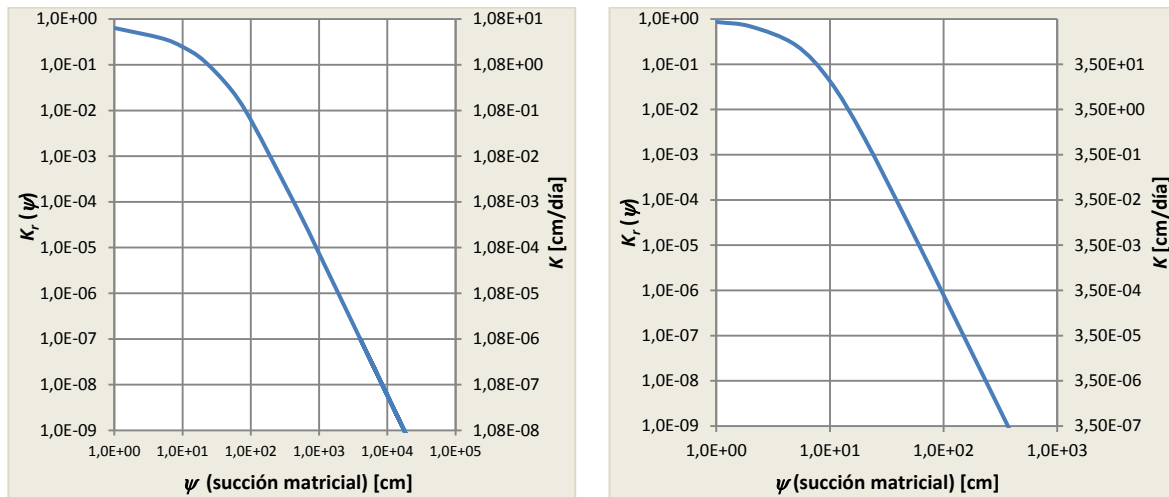


Figura 26. Curva succión matricial – K , para un suelo de textura *Franco limoso* (Izquierda) y *Areno francoso* (derecha) calculada con la ecuación de Van Genuchten (1980).

2.3.3 RESISTENCIA AL CORTE

Al igual que en los suelos saturados, en los cuales tradicionalmente se han relacionado esfuerzos normales y cortantes en la falla a través de la ecuación matemática de Mohr–Coulomb, en los suelos parcialmente saturados esta ecuación expresión ha sido extendida adicionando el aporte correspondiente a la resistencia al corte por succión matricial, como se observa en la siguiente expresión:

$$\tau = C' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \tau_{us} \quad (47)$$

τ = resistencia al corte, C' = cohesión efectiva, σ = esfuerzo normal total, u_a = presión del aire en los poros, ϕ' = ángulo efectivo de fricción interna, τ_{us} = resistencia al corte por succión matricial.

Diversos autores han definido la resistencia al corte por succión (τ_{us}) dependiendo de su investigación; algunos han estudiado la curva de retención suelo-agua (SWRC), también conocida como curva característica suelo-agua (SWCC) y a partir de ésta han formulado expresiones para predecir la resistencia al corte por succión, mientras que otros acudiendo al razonamiento matemático han encontrado expresiones empíricas que permiten estimar la resistencia al corte debida a la succión en los suelos parcialmente saturados.

Si el suelo se encuentra saturado totalmente, la presión del agua en los poros u_w , desplazará la presión de aire en los poros u_a y la ecuación (47) será la misma de Mohr-Coulomb conocida tradicionalmente: $\tau = C' + (\sigma - u_w) \tan \phi'$ (47a).

2.3.3.1 Ecuación de Bishop

Según lo citado por Garven y Vanapalli (2006), Tekinsoy et al. (2004) y otros autores, Bishop (1959) y Bishop y Bligh (1963) propusieron una ecuación para hallar el esfuerzo al corte en suelos parcialmente saturados, extendiendo el principio de esfuerzos efectivos de Terzaghi trabajado para suelos saturados.

$$\tau = C' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \chi(u_a - u_w) \tan \phi' \quad (48)$$

$\tau_{us} = \chi(u_a - u_w) \tan \phi'$ (49). τ = resistencia al corte, C' = cohesión efectiva, σ = esfuerzo normal total, u_a = presión del aire en los poros, ϕ' = ángulo efectivo de fricción interna, u_w = presión del agua en los poros, χ = parámetro de ajuste de Bishop.

Según lo reportado por Garven y Vanapalli (2006) y Fredlund (2006), Khalili y Khabbaz (1998) reexaminando la ecuación (48) han encontrado una relación entre el parámetro χ de Bishop y la tasa de succión (definida como el cociente entre la succión matricial y el valor de la entrada de aire en el suelo).

$$\chi = \left(\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right)^{-0,55} \quad (50)$$

El exponente $\eta = -0,55$ lo determinaron a partir de experimentación con 13 suelos de grano fino y caolín comercial. $(u_a - u_w)$ = succión matricial, $(u_a - u_w)_b$ = valor de entrada de aire, h_b .

$$(u_a - u_w)_b = h_b \quad (50a)$$

La expresión de succión matricial ($u_a - u_w$) y de esfuerzo normal neto ($\sigma - u_a$), se usan de la misma forma para todas las ecuaciones de resistencia relacionadas más adelante.

2.3.3.2 Ecuación de Fredlund

Según lo citado por Garven y Vanapalli (2006) y otros autores, mencionan que Fredlund et al. (1978) desarrollaron una expresión para evaluar la resistencia al corte en suelos parcialmente saturados, como se muestra a continuación:

$$\tau = C' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (51)$$

$\tau_{us} = (u_a - u_w) \tan \phi^b$ (52). τ = resistencia al corte, C' = cohesión efectiva, σ = esfuerzo normal total, u_a = presión del aire en los poros, ϕ' = ángulo efectivo de fricción interna, u_w = presión del agua en los poros, ϕ^b = ángulo de resistencia por fricción debido a la contribución de la succión matricial, $(u_a - u_w)$ = succión matricial. La Figura 27 representa la envolvente de falla de Mohr-Coulomb para suelos parcialmente saturados, presentada por Fredlund y Rahardjo (1993).

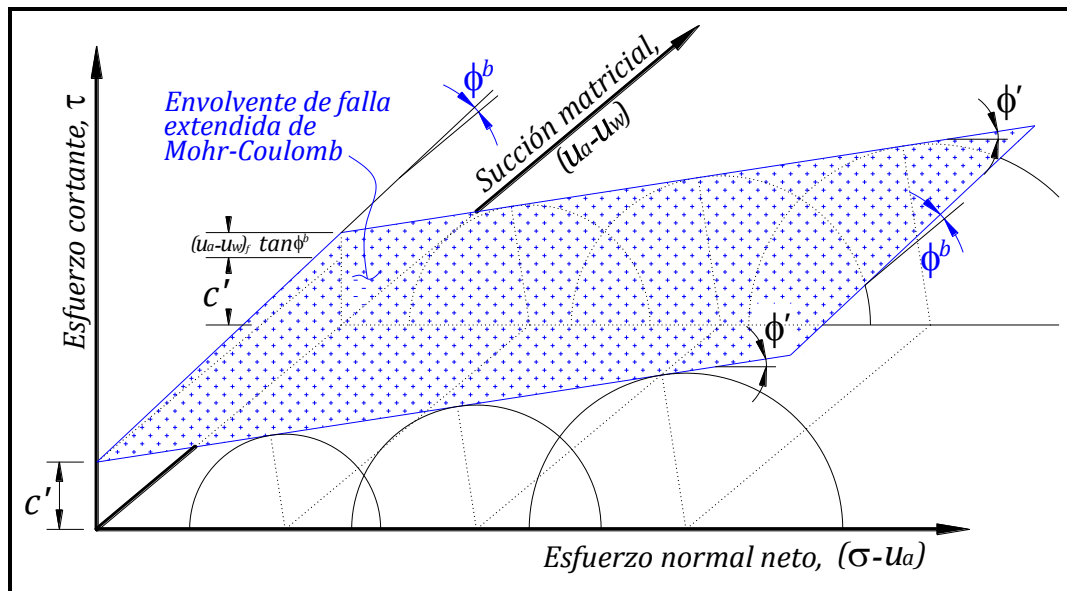


Figura 27. Envolvente de falla extendida de Mohr-Coulomb para suelos parcialmente saturados (Adaptado de Fredlund y Rahardjo, 1993).

2.3.3.3 Ecuación de Vanapalli

Según lo citado por Garven y Vanapalli (2006) y otros autores, Vanapalli (1996) desarrolló una expresión para evaluar la resistencia al corte en suelos parcialmente saturados, como se muestra a continuación:

$$\tau = C' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left(\frac{\theta_l - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi' \quad (53)$$

En este caso $\tau_{us} = (u_a - u_w) \left(\frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi'$ (54). τ = resistencia al corte, C' = cohesión efectiva, σ = esfuerzo normal total, u_a = presión del aire en los poros, ϕ' = ángulo efectivo de fricción interna, u_w = presión del agua en los poros. θ_s , θ_r , θ_i = contenido volumétrico de agua saturado, residual e inicial del suelo, respectivamente. $(u_a - u_w)$ = succión matricial.

Algunos autores al encontrar dificultad para hallar el valor de ϕ^b con la ecuación de Fredlund, han optado por hallar este parámetro trabajando igualmente con la ecuación de Vanapalli de la siguiente forma:

$$\tau_{us} = (u_a - u_w) \left(\frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi' = (u_a - u_w) \tan \phi^b, \quad \left(\frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi' = \tan \phi^b \quad (55)$$

2.3.3.4 Ecuación de Miao L., Lui S., y Lai Y

Miao et al. (2002) proponen una ecuación para predecir la resistencia al corte en *suelos expansivos* parcialmente saturados, hallando una expresión con forma hiperbólica. En esta propuesta se introduce el valor de presión atmosférica dentro de la expresión.

$$\tau = C' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \frac{a(u_a - u_w)}{1 + \frac{1-a}{P_{at}}(u_a - u_w)} \quad (56)$$

En este caso $\tau_{us} = \frac{a(u_a - u_w)}{1 + \frac{1-a}{P_{at}}(u_a - u_w)}$ (57). τ = resistencia al corte, C' = cohesión efectiva, σ = esfuerzo normal total, u_a = presión del aire en los poros, ϕ' = ángulo efectivo de fricción interna, u_w = presión del agua en los poros, P_{at} = presión atmosférica (101,3 kPa ó 1,0 atm ó 1,0 kg/cm² ó 14,2 psi ó 2050 psf), a = parámetro experimental hallado por análisis de regresión, $(u_a - u_w)$ = succión matricial.

2.3.3.5 Ecuación de Tekinsoy M.A., Kayadelen C., Keskin M.S. y Söylemez M.

Tekinsoy et al. (2004) proponen un modelo logarítmico en el que se introduce el valor de la presión atmosférica y de entrada de aire. Este modelo al ser comparado con el de Miao et al. (2002) y Rassam & Cook (2002), muestra mejor aproximación respecto de datos experimentales en diferentes suelos.

$$\tau = C' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \ln \left[\frac{(u_a - u_w) + P_{at}}{P_{at}} \right] [(u_a - u_w)_b + P_{at}] \tan \phi' \quad (58)$$

En este caso $\tau_{us} = \ln \left[\frac{(u_a - u_w) + P_{at}}{P_{at}} \right] [(u_a - u_w)_b + P_{at}] \tan \phi'$ (59). τ = resistencia al corte, C' = cohesión efectiva, σ = esfuerzo normal total, u_a = presión del aire en los poros, ϕ' = ángulo efectivo de fricción interna, u_w = presión del agua en los poros, P_{at} = presión atmosférica (101,3 kPa). $(u_a - u_w)$ = succión matricial, $(u_a - u_w)_b$ = valor de entrada de aire.

2.3.3.6 Otras ecuaciones

Garven y Vanapalli (2006) relacionan un total de 21 ecuaciones para evaluar la resistencia cortante en suelos parcialmente saturados, en las que se destacan las ecuaciones de Bishop y de Fredlund; evaluando algunas de las ecuaciones y comparando los resultados con datos reales, Garven y Vanapalli (2006) encontraron diferentes porcentajes de éxito, obteniendo mejores resultados con las ecuaciones que utilizan la SWCC como herramienta para la predicción del esfuerzo cortante en suelos parcialmente saturados.

Fredlund (2006) al igual que Garven y Vanapalli (2006), también relaciona 4 ecuaciones para evaluar la resistencia cortante en suelos parcialmente saturados, pero en este caso todas las ecuaciones utilizan datos de la SWCC como insumo.

2.3.3.7 Comentarios respecto de las ecuaciones de resistencia al corte en suelos parcialmente saturados

Garven y Vanapalli (2006) comentan que las ecuaciones para evaluar la resistencia al corte que utilizan la SWCC como insumo o herramienta, han mostrado ser las de mayor éxito a la hora de predecir el aporte de la succión en diferentes suelos; además estas ecuaciones trabajan directamente con datos medidos u obtenidos en ensayos y no es necesario conocer previamente la envolvente de falla del suelo para calcular parámetros y acomodarlos a las expresiones, tal como sucede en varias de las ecuaciones que no utilizan la SWCC.

La expresión de Fredlund, gráficamente es la que explica de mejor forma el concepto de la envolvente de falla extendida de Mohr-Coulomb para suelos parcialmente saturados; además combinando τ_{us} de la ecuación de Vanapalli se puede aproximar el valor de ϕ^b , subsanando lo que para algunos investigadores resultaba un obstáculo para aplicar la ecuación de Fredlund. De esta forma, en el presente trabajo se adoptará la ecuación de Fredlund para evaluar la resistencia al corte en suelos parcialmente saturados.

2.4 EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD DE TALUDES

En los últimos años, un creciente número de autores han publicado sus trabajos de investigación sobre estabilidad de taludes en diversos medios escritos, en especial involucrando suelos parcialmente saturados, análisis probabilísticos, análisis de deformaciones y aplicaciones de envolventes de falla curvas. A continuación se enumeran algunos trabajos desarrollados en las últimas dos décadas sobre la influencia de las lluvias en la estabilidad de taludes.

2.4.1 ESTUDIO DE FREEZE (1969)

El autor cita modelos que examinan la infiltración de la lluvia con diversas restricciones y condiciones de frontera elaborados por autores desde Klute (1952), hasta Ibrahim & Brutsaert (1968), entre otros; adicionalmente se presenta el modelo matemático aportado por Freeze, el cual trabaja con varios parámetros que representan la carga y descarga del

suelo producida por la infiltración y evaporación del agua, abordando desde ese entonces el tema de suelos parcialmente saturados. El modelo de Freeze trabaja en 1-D, simplificando la ecuación de Richards en 3-D, tomando parámetros de 3 texturas de suelo trabajando manualmente cabeza total, cabeza de presión y contenido de agua estudiando el efecto de: tipo de suelo (Figura 28), la intensidad y duración de la lluvia, el contenido inicial de agua en el suelo, la tasa de carga y descarga de humedad y la profundidad de la tabla de agua.

El autor concluye que es engañoso estimar la infiltración a partir de la conductividad hidráulica saturada y la textura del suelo, es más exacto conocer las funciones que relacionan cabeza de presión ψ , permeabilidad, capacidad específica de almacenamiento de agua y contenido volumétrico de agua θ .

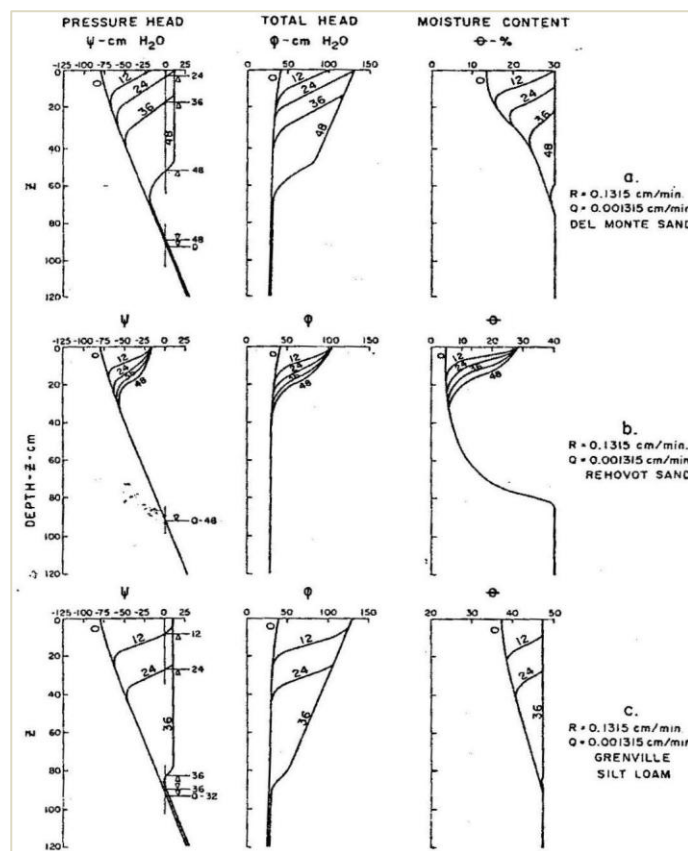


Figura 28. Efecto del tipo de suelo, para tres texturas de suelo (Tomado de Freeze, 1969).

2.4.2 ESTUDIO DE PRADEL Y RAAD (1993)

Estos autores, investigando el efecto de la permeabilidad en la estabilidad superficial en los taludes homogéneos han encontrado que la cohesión del suelo juega un papel preponderante en la estabilidad de taludes, inclusive más importante que el ángulo de fricción. En sus estudios han encontrado que los suelos con permeabilidades bajas son

más propensos a desarrollar inestabilidad superficial que aquellos que presentan mayores permeabilidades, es decir suelos arcillosos y limosos son más propensos a desarrollar inestabilidad superficial que los suelos arenosos o gravosos. Estudiando el modelo de Talud Infinito y la ecuación de Green Ampt (1911) encontraron que los suelos con permeabilidades más grandes que la permeabilidad límite K_{lim} , dependiente de la profundidad del frente húmedo y la correspondiente succión, nunca serán saturados.

2.4.3 ESTUDIO DE ANDERSON Y SITAR (1995)

Anderson y Sitar (1995) estudiando la relación entre lluvia y flujo de detritos, encontraron que los flujos se producen principalmente en suelos residuales y coluviales. Los deslizamientos superficiales ocurren en profundidades menores a 3,0 m y la superficie de falla es sub-paralela a la superficie del talud. Las lluvias intensas producen aumentos temporales de presiones de poros que a su vez ocasionan reducción en los esfuerzos efectivos y aumento de la conductividad hidráulica. Con las lluvias intensas, en la superficie se produce un aumento en la presión de poros que a su vez mueve la trayectoria de esfuerzos en forma horizontal e intercepta la envolvente de falla, generando que el suelo colapse (Figura 29).

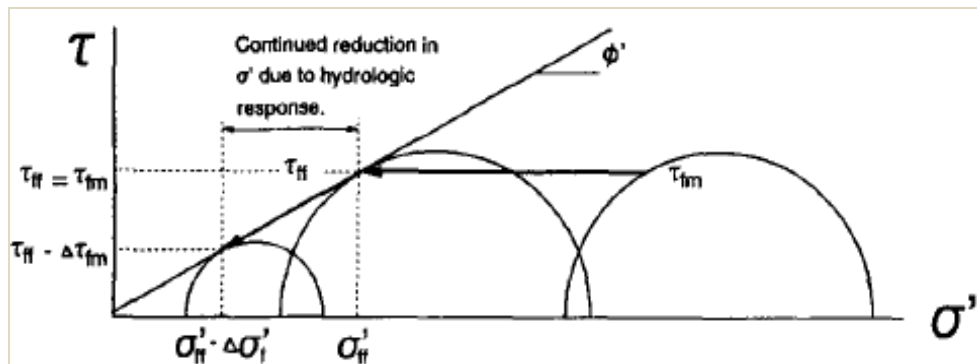


Figura 29. Esquema de la reducción de esfuerzos debido a la respuesta hídrica del suelo (Tomado de Anderson y Sitar, 1995).

2.4.4 ESTUDIO DE NG Y SHI (1998)

Estos autores analizan la estabilidad de taludes en Hong Kong, involucrando la investigación de Pradel y Raad (1993) y la ecuación de Lumb (1962), trabajando con flujo en 2-D con saturación del suelo al 100%; realizando un estudio paramétrico construyeron curvas de presión de poros contra nivel del terreno, analizando la influencia de la duración de las lluvias en la estabilidad de los taludes (Figura 30). Estos autores encontraron que el **Factor de Seguridad** no solo depende de la intensidad de la lluvia, también depende de las condiciones iniciales del nivel freático, la relación de permeabilidad anisotrópica, pero en especial de la lluvia antecedente.

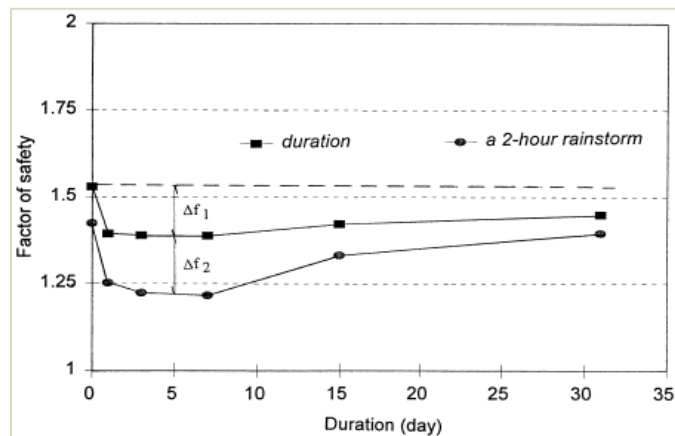


Figura 30. Factor de Seguridad vs duración de la lluvia para un talud de referencia. (Línea superior) lluvia normal, (Línea inferior) lluvia intensa de corta duración. También se muestra Δf respecto del *Factor de Seguridad* en condiciones secas (línea discontinua) (Tomado de Ng y Shi, 1998).

2.4.5 ESTUDIO DE GASMO, RAHARDJO Y LEONG (2000)

Los autores estudian el efecto de la infiltración en la estabilidad de un suelo residual, usando el criterio de falla de extendido de Mohr-Coulomb propuesto por Fredlund y Rahardjo (1993); encontraron limitaciones en su trabajo, pero finalmente fueron capaces de ilustrar el efecto de la infiltración en la estabilidad del talud combinando la modelación y análisis de infiltración y estabilidad de taludes. Presentaron una gráfica de *Factor de Seguridad* para diferentes días del año y diferentes intensidades de lluvia, según el caso particular estudiado por ellos (Figura 31). Los autores realizan una comparación gráfica de las presiones de poros modeladas con el software y las medidas en campo.

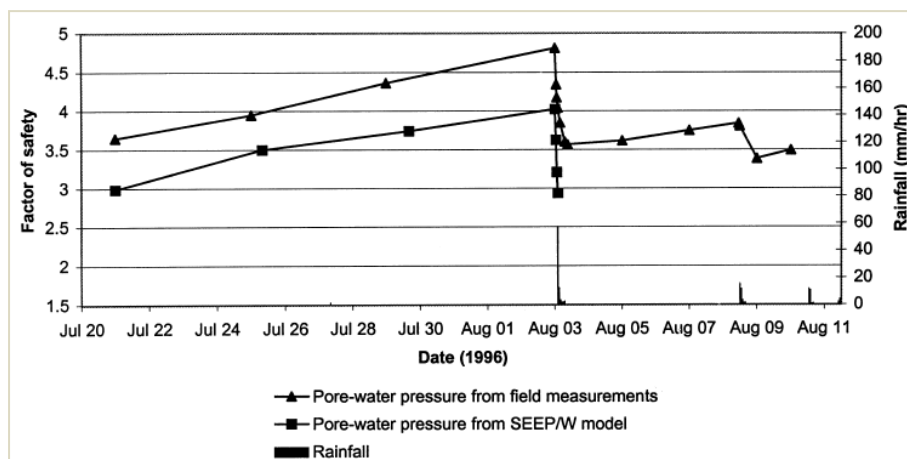


Figura 31. Factores de Seguridad a lo largo de julio y agosto de 1996 para el caso particular estudiado por Gasmo, Rahardjo Y Leong (Tomado de Gasmo et al., 2000).

2.4.6 ESTUDIO DE CHO Y LEE (2002)

Estos investigadores evalúan la estabilidad superficial de taludes homogéneos bajo la acción de la lluvia, los autores citan el modelo de infiltración de Mein y Larson (1973), el cual soluciona explícitamente la infiltración por encharcamiento, llevando a cabo varios análisis numéricos por medio de elementos finitos, concluyendo que el mencionado método de Mein y Larson (1973) arroja buenos resultados, comparables con las simulaciones con software (Figura 32).

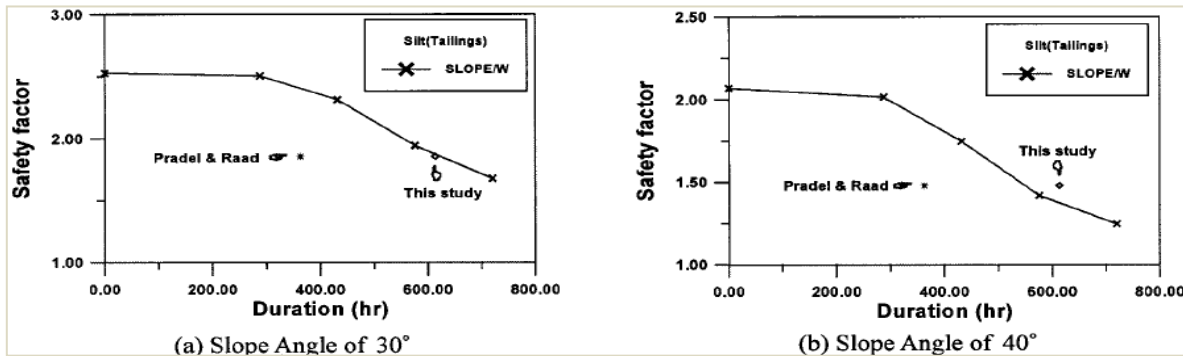


Figura 32. Comparación de *Factores de Seguridad* en la estabilidad modelando con software (Seep/W para infiltración y Slope/W para estabilidad), infiltración con el método de Pradel y Raad y finalmente la metodología de Mein y Larson (Tomado de Cho y Lee, 2002).

2.4.7 ESTUDIO DE KIM J., JEONG S., PARK S. Y SHARMA J. (2004)

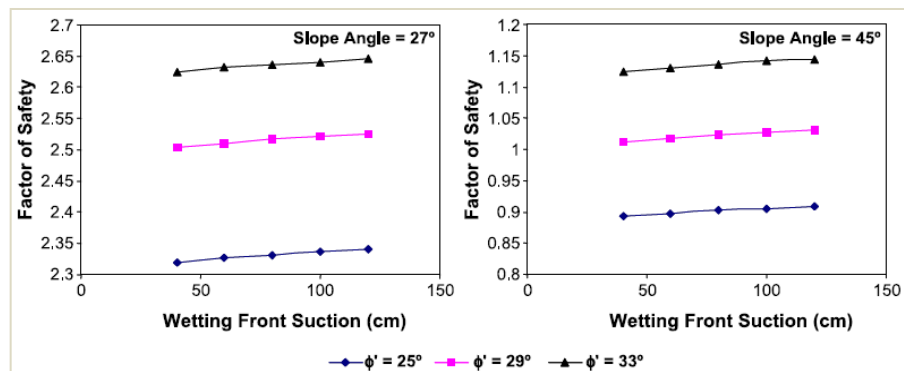


Figura 33. Relación entre el *Factor de Seguridad* y la succión en el frente húmedo para tres valores de ángulo de fricción y dos inclinaciones de talud (Tomado de Kim et al., 2004).

Realizando procedimientos de laboratorio con papel filtro para hallar la SWCC en suelos meteorizados estudiando la influencia de la infiltración causada por la lluvia, estos autores trabajan y comparan las expresiones de Fredlund y Xing (1994) y Van Genuchten (1980). Adicionalmente utilizan las expresiones de Pradel y Raad (1993) con el objeto de calcular la profundidad del frente húmedo y la succión, para luego apoyarse en el criterio de falla de extendido de Mohr-Coulomb propuesto por Fredlund y Rahardjo (1993) analizando la estabilidad de taludes por medio del talud infinito (Figura 33). Así mismo se modeló la

infiltración por medio de software, encontrado diferencias entre los dos análisis de infiltración. El estudio demuestra que la profundidad del frente húmedo juega un papel preponderante en la estabilidad de los suelos meteorizados y que las expresiones de Pradel y Raad (1993) deben usarse con precaución en los suelos meteorizados de Corea, debido a que el Factor de Seguridad de un talud infinito compuesto de estos suelos se reduce drásticamente cuando la profundidad del frente húmedo es mayor a 120 cm, profundidad asociada con la cohesión efectiva de estos suelos, que es de 10 kPa aproximadamente.

2.4.8 ESTUDIO DE CHO (2009)

El autor evalúa la estabilidad superficial de dos texturas de suelos considerando el efecto de la lluvia con el modelo de talud infinito y trabajando con el criterio de falla extendido de Mohr-Coulomb propuesto por Fredlund y Rahardjo (1993). En este caso, el autor modela por separado el flujo en condiciones parcialmente saturadas y el flujo en condiciones saturadas, tomando una textura y luego dos texturas de suelo, encontrado que la modelación de estabilidad con flujo parcialmente saturado incrementa el **Factor de Seguridad**, comparándola con la modelación de estabilidad para flujo saturado. El salto que se observa en la Figura 34, corresponde al cambio de suelo.

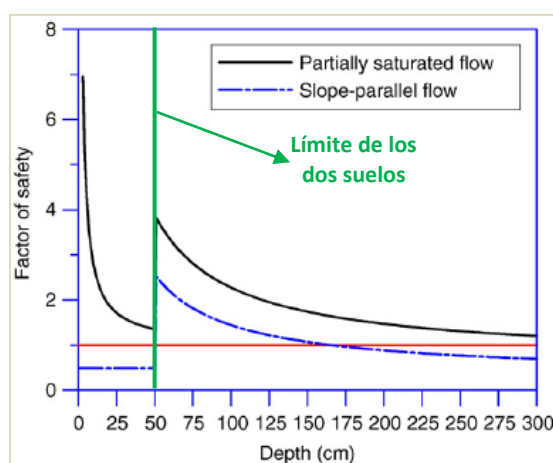


Figura 34. Variación del **Factor de Seguridad** con la profundidad del frente húmedo para dos texturas de suelo con flujo parcialmente saturado y flujo paralelo (saturado) (Tomado de Cho, 2009).

2.4.9 ESTUDIO DE LEE L., GOFAR N., RAHARDJO H. (2009)

En 2009, estos autores desarrollaron la metodología denominada **PERISI** (Evaluación Preliminar de Inestabilidad de Taludes Inducida por Lluvia) que involucra un análisis estadístico de lluvia y las propiedades intrínsecas de suelos parcialmente saturados. La mencionada metodología es comparada con modelaciones realizadas con software de infiltración y estabilidad de taludes, involucrando los mismos parámetros del suelo y las mismas condiciones de lluvia (Figura 35). Los resultados obtenidos demostraron que la

metodología **PERISI** produce resultados tan buenos y confiables como los obtenidos con el software que modela infiltración y estabilidad de taludes.

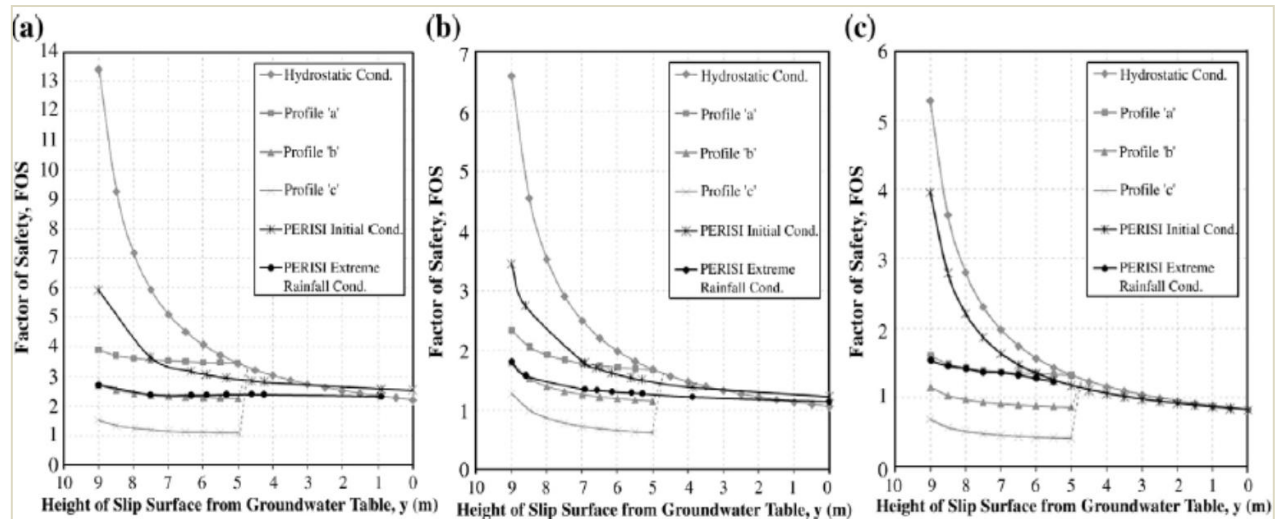


Figura 35. Variación del *Factor de Seguridad*, hallado con la metodología PERISI y el modelo de Rahardjo (1995) para: (a) grava limosa, (b) arena limosa y (c) limo, para diferentes profundidades de la tabla de agua (Tomado de Lee et al., 2009).

2.4.10 ESTUDIO DE LADE (2010)

Según el documento que presenta Lade (2010), no es seguro usar el criterio de Mohr-Coulomb para evaluar la estabilidad en el modelo de talud infinito, puesto que gran parte del *Factor de Seguridad* se debe a la cohesión y esta no existe en el suelo a no ser que este se encuentre cementado. En los deslizamientos superficiales, el rango de esfuerzos normales efectivos no se usan en laboratorio puesto que los valores de cohesión y el ángulo de fricción que se trabajarían no serían los correctos. Lade (2010) propone trabajar una envolvente curva en vez de trabajar con la envolvente lineal del criterio de falla de Mohr-Coulomb, Figura 36.

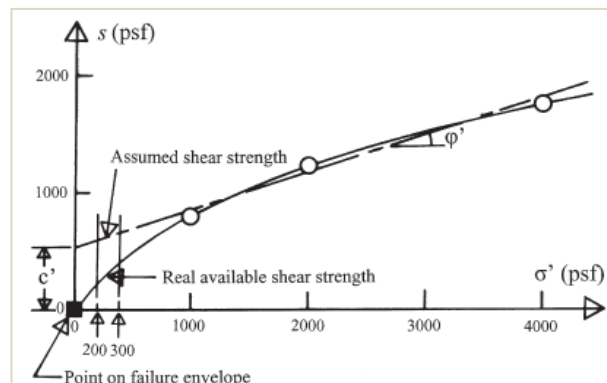


Figura 36. Comparación de la envolvente de falla de Mohr – Coulomb, con la envolvente real de falla para un suelo analizado (Tomado de Lade, 2010).

3. MODELACIÓN DE LA RESPUESTA HÍDRICA

La modelación de la infiltración y respuesta hídrica del suelo se realiza con el software Hydrus ® versión 1.11, que trabaja en 1-D, 2-D y 3-D. Este software pertenece a PC-Progress (www.pc-progress.cz), que tiene sede en Praga, República Checa y ha sido desarrollado por: J. Šimůnek de la Universidad de California (Riverside, California), M. Šejna de PC-Progress (Praga, República Checa) y M. Th. Van Genuchten del George E. Brown, Jr. Salinity Laboratory (Riverside, California).

Hydrus ® simula el movimiento del agua en medios saturados y parcialmente saturados, usando la teoría de elementos finitos. El algoritmo del software está programado para resolver la ecuación de Richards, combinando parámetros hidráulicos para la SWCC de 12 texturas de suelo, que se muestran en la Tabla 22 del capítulo 2. Los parámetros que caracterizan la SWCC de las 12 texturas de suelos pueden obtenerse de los modelos de de Van Genuchten (1980), Brooks y Corey (1964) o Kosugi (1996); como cuarta opción para la estimación de parámetros de la SWCC, se usan redes neuronales trabajando con una versión liviana de ROSETTA ®.

Para las modelaciones en 2-D y 3-D también se estudiará el efecto de la lluvia en la infiltración y en la respuesta hídrica del suelo. Algunas modelaciones presentarán valores de duración D e intensidad I de lluvias, que pueden iniciar deslizamientos, según estudios realizados en la última década.

3.1 UMBRALES DE LLUVIA PARA EL INICIO DE DESLIZAMIENTOS

Vásquez (2008) presenta algunos de los umbrales de intensidad-duración que se han estudiado en las dos últimas décadas, entre ellos: Cuadros y Siza (2003) en Manizales, Guzzetti et al. (2005) para el programa europeo RISK AWARE, Giannecchini (2005) en Toscana (Italia) y Hong et al. (2006) sobre la misión NASA – TRMM.

Se tendrá como referencia el trabajo de Guzzetti et al. (2005), en el cual se analizan 1632 datos que representan lluvias detonantes de deslizamientos y 590 datos de lluvias que no resultan en deslizamientos, en todo el mundo, de los cuales se ha tipificado el 65,0% como deslizamientos superficiales.

Guzzetti et al. (2005) proponen nuevas ecuaciones de umbrales de intensidad-duración de lluvia para el inicio de deslizamientos, referenciando el modelo climático de Köppen y trabajando con el análisis Bayesiano, como se observa en la Tabla 25 y Figura 37. Como resultado del estudio, estos autores presentan una ecuación que resume el trabajo realizado, generalizando y afinando los umbrales de intensidad-duración de lluvia para el inicio de deslizamientos, la ecuación es la número 4 de la Tabla 25 y Figura 37.

Tabla 25. Umbrales de intensidad-duración de lluvia para el inicio de deslizamientos (Adoptado de Guzzetti, 2005)

No.	Autor	Zona	Extensión	Tipo deslizamiento	Ecuación	Rango
1	Caine (1980)	Mundial	Global	Todos	$I = 14,82 D^{-0,39}$	$0,167 \text{ h} < D < 500 \text{ h}$
2	Innes (1983)	Mundial	Global	Flujo detritos	$I = 4,93 D^{-0,49}$	$0,1 \text{ h} < D < 100 \text{ h}$
3	Crosta y Frattini (2000)	Mundial	Global	Superficiales	$I = 0,48 + 7,2 D^{-1}$	$0,1 \text{ h} < D < 1000 \text{ h}$
4	Guzzetti et al. (2005)	Mundial	Global	Todos	$I = 0,14 + 1,52 D^{-0,45}$	$0,1 \text{ h} < D < 3000 \text{ h}$
5	Guzzetti et al. (2005)	Mundial	Global	Todos	$I = 22,21 D^{-0,55}$	$0,1 \text{ h} < D < 3000 \text{ h}$
6	Guzzetti et al. (2005)	Mundial	Global	Todos	$I = 2,81 D^{-0,16}$	$0,1 \text{ h} < D < 3000 \text{ h}$
7	Guzzetti et al. (2005)	Mundial	Global	Todos	$I = 67,41 D^{-0,69}$	$0,1 \text{ h} < D < 3000 \text{ h}$
8	Guzzetti et al. (2005)	Mundial	Global	Todos	$I = 30,36 D^{-0,40}$	$0,1 \text{ h} < D < 3000 \text{ h}$
9	Guzzetti et al. (2005)	Mundial	Global	Todos	$I = 8,44 D^{-0,52}$	$0,1 \text{ h} < D < 3000 \text{ h}$
10	Guzzetti et al. (2005)	Mundial	Global	Todos	$I = 3,43 D^{-0,40}$	$0,1 \text{ h} < D < 3000 \text{ h}$

Ecuación según el clima: **5** clima tropical húmedo, **6** clima latitud media, **7** clima subtropical húmedo templado latitud media con humedad constante, **8** clima subtropical húmedo templado latitud media con estación seca en invierno, **9** clima de zona montañosa, **10** clima templado de latitud media. **Unidades:** I [mm/h], D [h]

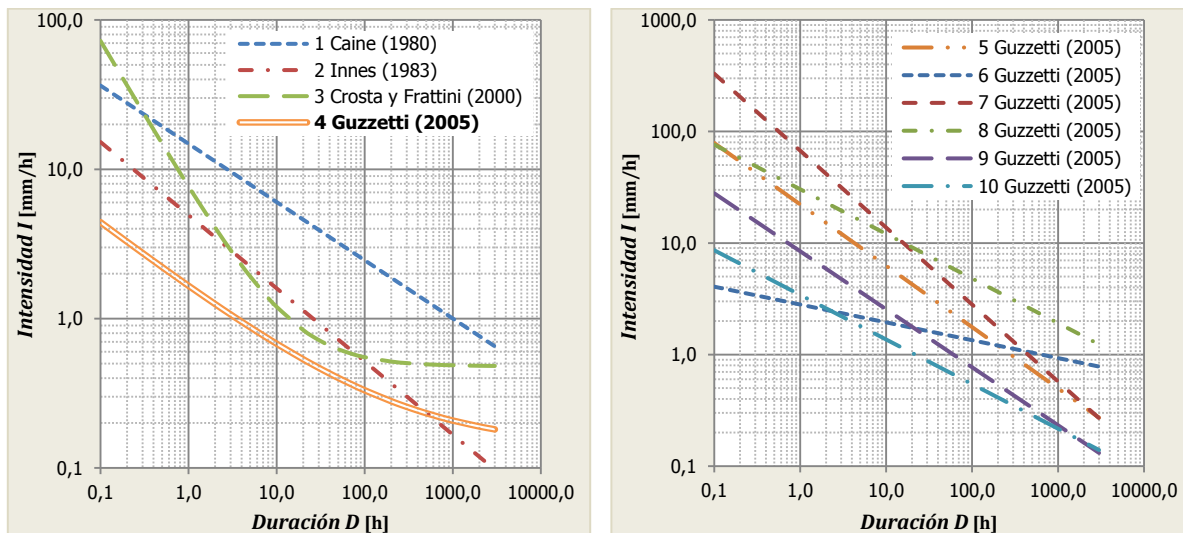


Figura 37. (Izquierda) Comparación de los 4 primeros umbrales de la Tabla 25 para el inicio de deslizamientos. (derecha) Comparación de los umbrales según el clima: **5** clima tropical húmedo, **6** clima latitud media, **7** clima subtropical húmedo templado latitud media con humedad constante, **8** clima subtropical húmedo templado latitud media con estación seca en invierno, **9** clima de zona montañosa, **10** clima templado de latitud media (Adaptado de Guzzetti, 2005).

Castellanos y González (1997), presentan relaciones de lluvia acumulada crítica ($Llac$) con lluvia anual ($Llan$) y duración crítica acumulada de la lluvia (Dac) con lluvia acumulada crítica ($Llac$), como resultado de un estudio estadístico de lluvias críticas que disparan movimientos en masa en Colombia. Las expresiones son las siguientes:

$$Llac = 51 + 0,41 Llan \quad (60a)$$

$$Dac = 3,3 Llac^{0,42} \quad (60b)$$

Unidades: $Llac$ [mm], $Llan$ [mm] y Dac [días].

Mayorga (2003), para hallar los umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia, luego de acudir al método estadístico conocido como método de agrupación, regionalizó el territorio nacional en 4 grupos que comparten o difieren valores de lluvia acumulada, lluvia anual, duración y altitud, con deslizamientos registrados; los umbrales de lluvia para los 4 grupos se encuentran consignados en la Tabla 26 y Figura 38, relacionando la lluvia del evento (*Llev*) y la lluvia acumulada (*Llac*). En su trabajo, Mayorga (2003) registró 135 eventos entre los años 1950 y 2000.

Tabla 26. Umbrales de lluvia detonante (Adaptado de Mayorga, 2003)

Grupo	Ecuación	Zona en Colombia
1	$Llev = -1,5824 Llac + 421,5517$	Cuenca del río Catatumbo. Cuenca del río Sogamoso. Montaña Nariñense.
2	$Llev = -0,7479 Llac + 470,2936$	Sierra Nevada de Santa Martha. Litoral central. Medio Cauca y alto Nechi. Alto Cauca. Alto Magdalena.
3	$Llev = -0,5172 Llac + 509,0898$	Medio Magdalena. Sabana de Bogotá. Alto Patía.
4	$Llev = -0,3550 Llac + 525,6627$	Río Arauca y media del río Meta. Piedemonte llanero. Piedemonte amazónico.

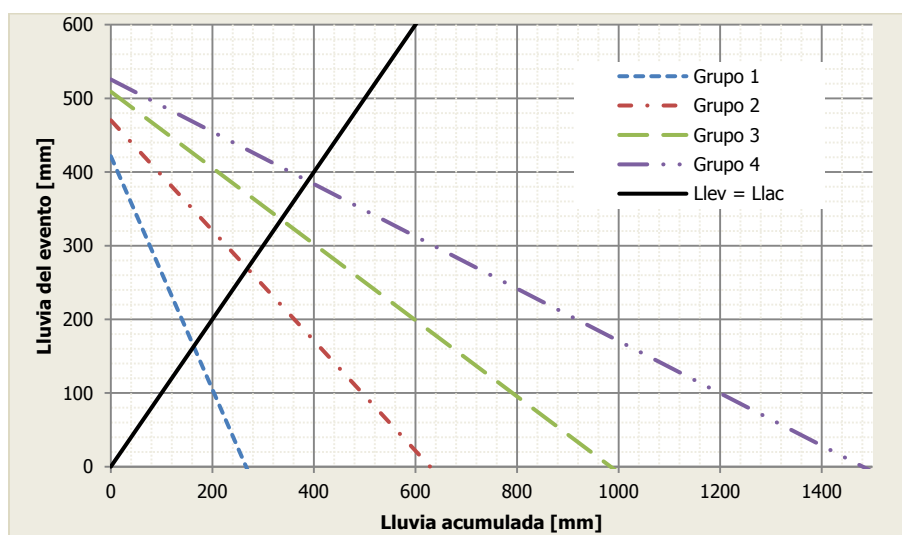


Figura 38. Representación gráfica de los umbrales de lluvia detonante (Adaptado de Mayorga, 2005).

3.2 MODELACIÓN EN 2-D

3.2.1 MODELACIÓN EN 2-D CON 1 TEXTURA DE SUELO

Tomando las 12 texturas de suelo que se encuentran en la Tabla 22 incluyendo los parámetros de la SWCC de Van Genuchten (1980), con ayuda de Hydrus ® se modeló la infiltración en 2-D para las 12 texturas de suelo en forma independiente, con espesores de

5,0 m, 4,0 m, 3,0 m, 2,0 m, 1,0 m y 0,5 m, todas con inclinación = 15° respecto de la horizontal y longitud = 15,0 m. Todas cuentan con *cabeza de presión* $\psi = -100$ cm como condición inicial, con las siguientes condiciones de frontera: en la parte inferior impermeable, a la derecha flujo libre, a la izquierda y superficie con flujo y entrada constante de agua; como se tienen 12 texturas de suelo con igual ψ inicial, se tienen 12 θ_i diferentes, 12 tiempos diferentes en los cuales se saturan los suelos y 12 tiempos diferentes en los cuales se maximiza y estabiliza la presión de poros. La Figura 39 muestra la presión de poros luego de terminar una de las simulaciones, que en total suman 72 combinando las 12 texturas y 6 espesores, en el *Apéndice Magnético* se han consignado las 72 modelaciones.

En cada una de las 72 simulaciones se han ubicado *puntos de control* distribuidos en el espesor del estrato de suelo, alineados en un eje vertical imaginario situado en la mitad de la longitud; estos puntos de control registran datos de θ y ψ a través del tiempo simulado, actuando como lo haría la instrumentación del terreno en condiciones reales. Como ya se ha mencionado, las simulaciones han comenzado con $\psi = -100$ cm, pero diferente θ_i para cada suelo, llevándolas en el tiempo hasta que se saturan y posteriormente se maximiza y estabiliza la cabeza de presión ψ en cada punto de control, encontrando lo siguiente:

- Todos los suelos luego de saturarse pasan de $\psi = 0$ a $\psi > 0$ constante en un tiempo relativamente corto, dependiendo de la profundidad en la que se mida desde superficie, sin importar su textura.
- Una vez se alcanza la condición constante de cabeza de presión $\psi > 0$ en el suelo, para cada profundidad z (medida desde la superficie) se puede obtener la cabeza de presión ψ , que es aproximadamente la misma sin importar la *textura o espesor del suelo*, debido a que el agua que satura sus vacíos se encuentra interconectada actuando como una columna; un ejemplo se puede observar en la Figura 40.

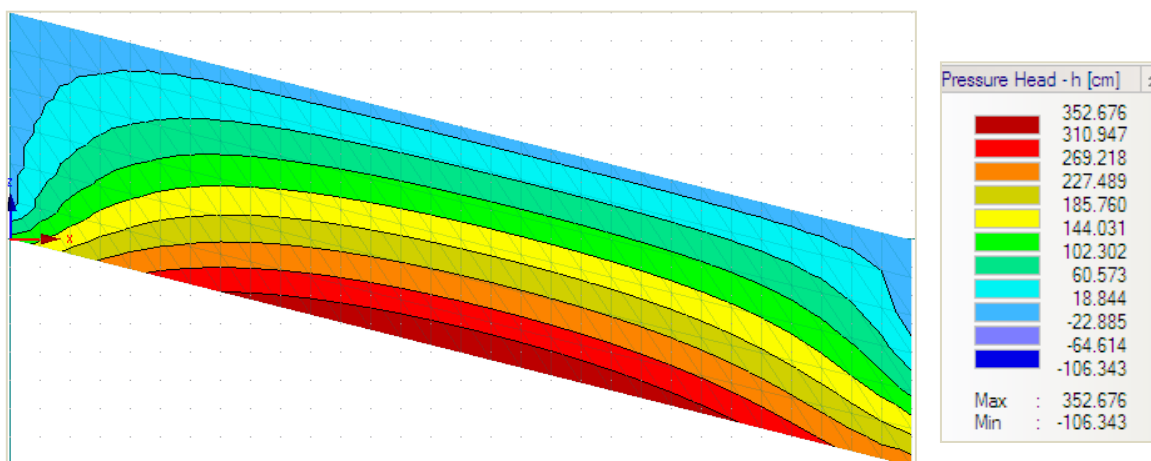


Figura 39. Ejemplo de ψ alcanzadas al final de la simulación para un suelo de textura *clay loam* (Franco arcilloso), con espesor de 4,0 m, luego de 141,6 horas de infiltración simuladas.

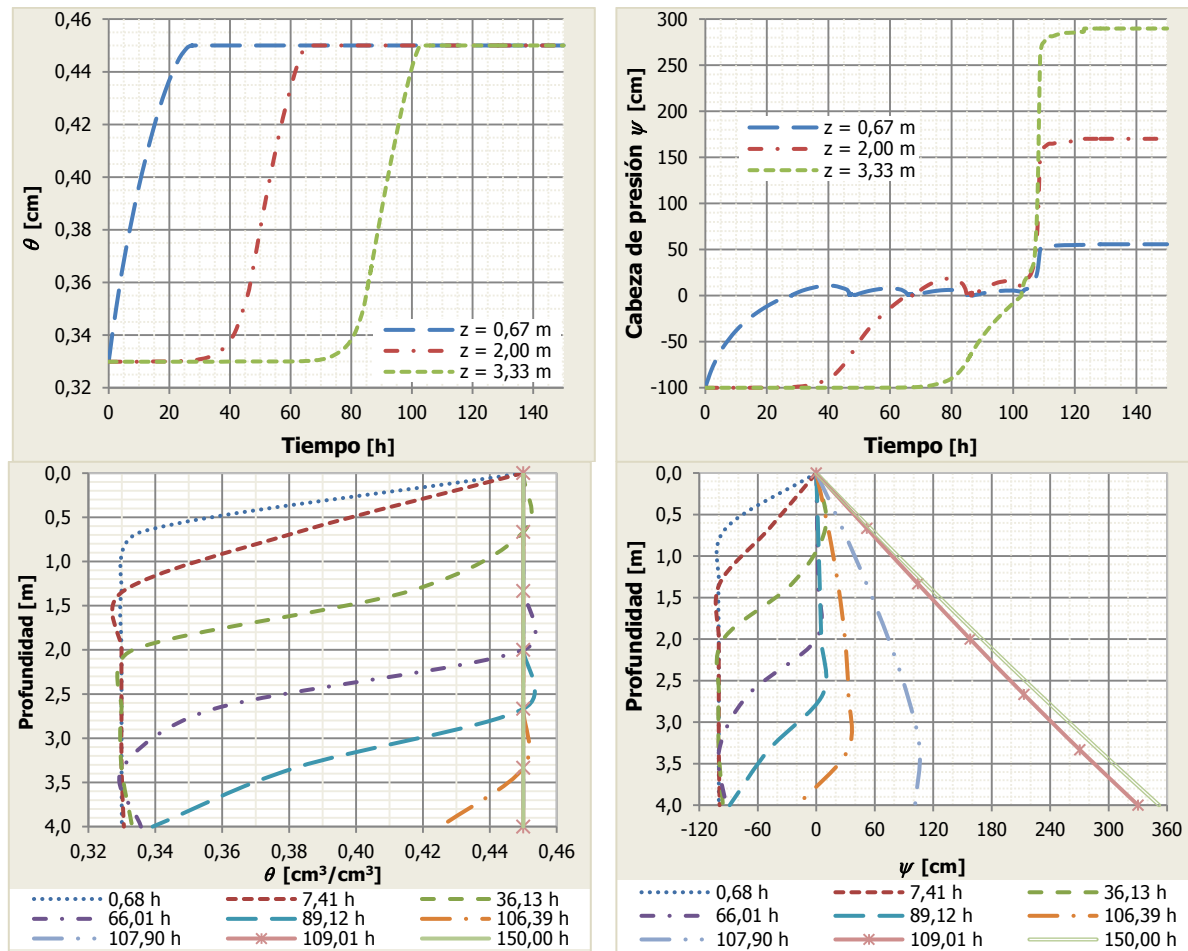


Figura 40. (Izquierda superior) variación de θ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (derecha superior) variación de ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (izquierda inferior) variación de z con θ a diferentes tiempos t , (derecha inferior) variación de z con ψ a diferentes tiempos t , para un suelo de textura *silt loam* (Franco limoso), con espesor de 4,0 m, luego de 150 horas de infiltración simuladas.

En la Figura 40 se observan resaltos en las curvas (pequeños valores positivos de ψ antes de 108 horas), probablemente debido a aproximaciones de los elementos finitos con los que trabaja el software. Luego de 108 horas aproximadamente, el suelo alcanza los máximos valores de cabezas de presión ψ para las diferentes profundidades medidas desde superficie. Detallando la profundidad de 2,0 m, se produce un incremento progresivo de cabezas de presión ψ , pero solo hasta que la saturación penetra el suelo en todo su espesor, se produce el rápido incremento de cabezas de presión ψ hasta llegar a los valores máximos. Cuando la saturación del suelo alcanza la totalidad del espesor se produce una columna de agua, debido a la interconexión de vacíos llenos de agua y de esta forma se produce el rápido incremento de cabezas de presión ψ .

Teniendo en cuenta lo anterior, relacionando las 72 simulaciones (ver *Apéndice Magnético*) y los puntos de control con sus respectivas profundidades desde la superficie, se observa que para cualquier textura de suelo se pueden obtener aproximadamente los mismos valores de cabeza de presión ψ variando con la profundidad z . En la Figura 41 se

muestra la gráfica que relaciona la profundidad z medida desde superficie, con la cabeza de presión ψ ; también se encuentran los valores promedio de las ψ alcanzadas para cada profundidad con las 72 modelaciones realizadas. Adicionalmente se observa la presión hidrostática, que como su nombre lo indica se encuentra estática, mientras que la línea que relaciona $\psi - z$ muestra la presión en condición de flujo.

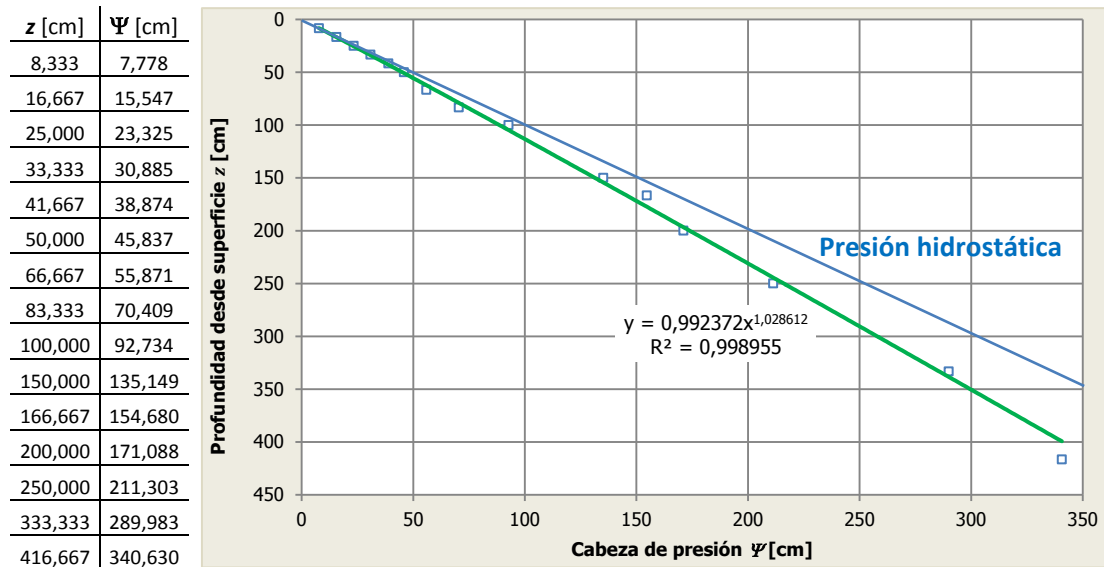


Figura 41. Valores promedio de cabezas de presión ψ para cada profundidad z medida desde superficie, para las 12 texturas de suelo de la Tabla 22. Gráfica de relación de $\psi - z$, para profundidades de 0,0 m a 5,0 m. según las simulaciones realizadas.

Para observar la relación entre los diferentes θ_i , el tiempo de saturación y el tiempo en el que el suelo alcanza su máxima cabeza de presión ψ , se ha modelado la infiltración continua en un suelo de 4,0 m de espesor, 15,0 m de largo y con una inclinación de 15° respecto de la horizontal. El suelo con el que se trabajarán las modelaciones será Franco limoso (*silty loam*). Con ayuda de Hydrus ® se simuló la infiltración del suelo partiendo de diferentes θ_i hasta saturarlo, al igual que en el anterior grupo de simulaciones; por medio de la Tabla 27 y la Figura 42 se encontró que el tiempo de saturación es inversamente proporcional al valor de θ_i y también a su máxima cabeza de presión ψ . La diferencia entre el contenido volumétrico de agua inicial y final, $\Delta\theta$, en este caso es proporcional al tiempo en que el suelo se satura y al tiempo en que alcanza su máxima cabeza de presión ψ . Adicionalmente se observa que:

- El valor de cabeza de presión ψ máxima que alcanza el suelo poco tiempo después de saturarse, es el mismo sin importar el valor de θ_i con el que el suelo comienza a saturarse.
- Existe proporcionalidad entre θ_i y la diferencia de tiempo en que el suelo se satura (t_s) y el tiempo en que alcanza su máxima ψ ($t_{\psi_{m\acute{a}x}}$), $\Delta t = t_{\psi_{m\acute{a}x}} - t_s$, es decir son inversamente proporcionales; mientras que $\Delta\theta$ es proporcional con Δt .

En la Figura 42 se han construido 4 curvas, 2 de ellas correspondientes a los valores de θ_i relacionados con el tiempo de saturación t_s y el tiempo en que alcanza su máxima cabeza de presión ψ , $t_{\psi \text{ máx}}$, que comienzan de izquierda a derecha con altos valores de θ_i ; adicionalmente se han construido 2 curvas que corresponden con valores de $\Delta\theta$ relacionados con el tiempo de saturación t_s y el tiempo en que alcanza su máxima ψ $t_{\psi \text{ máx}}$ comenzando de derecha a izquierda con valores bajos de θ_i . Los valores de $\Delta\theta$, t , θ_i para el suelo modelado, pueden relacionarse por medio de las expresiones consignadas en la Figura 42, reemplazando los valores de: $x=t$, $y=\theta_i$ o $y=\Delta\theta$, según sea el caso.

Tabla 27. Resultados de las modelaciones relacionando θ_i con el tiempo t , para el suelo de textura Franco limoso, según los datos de la Tabla 22

θ_i [cm ³ /cm ³]	$\Delta\theta$ [cm ³ /cm ³]	Tiempo Sat. [h]	Tiempo $\psi_{\text{máx}}$ [h]	$\psi_{\text{máx}}$ [cm]		
				z = 0,67 m	z = 2,00 m	z = 3,33 m
0,075	0,375	294,11	346,20	55,72	170,15	289,81
0,100	0,350	278,31	326,94	55,72	170,14	289,81
0,125	0,325	260,37	307,42	55,72	170,14	289,80
0,150	0,300	244,11	287,08	55,70	170,14	289,73
0,175	0,275	226,40	266,90	55,72	170,14	289,80
0,200	0,250	207,01	243,98	55,72	170,14	289,80
0,225	0,225	187,02	221,83	55,72	170,14	289,80
0,250	0,200	166,97	198,93	55,72	170,14	289,81
0,275	0,175	146,67	175,59	55,72	170,14	289,80
0,300	0,150	126,20	151,96	55,72	170,15	289,81
0,325	0,125	106,58	127,87	55,72	170,14	289,80
0,350	0,100	87,22	103,32	55,72	170,14	289,80
0,375	0,075	67,98	78,76	55,72	170,14	289,80
0,400	0,050	47,37	53,72	55,72	170,14	289,79
0,425	0,025	23,70	28,00	55,72	170,14	289,79
Promedio				55,72	170,14	289,80

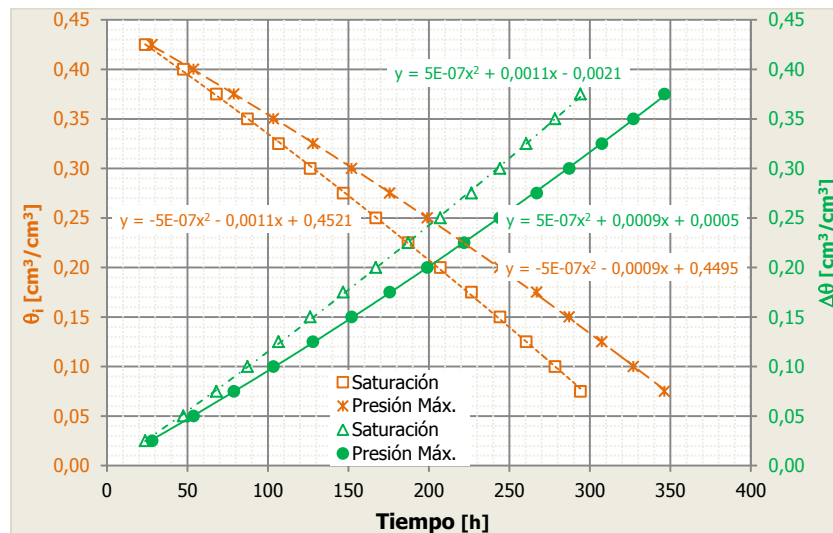


Figura 42. Curvas que relacionan θ_i (naranja) y $\Delta\theta$ (verde) con el tiempo de saturación t_s y el tiempo en que alcanza su máxima ψ ($t_{\psi \text{ máx}}$), para el suelo con textura *Franco limoso*.

3.2.2 MODELACIÓN EN 2-D CON VARIAS TEXTURAS DE SUELO

Tomando 3 texturas de suelo de la Tabla 22 incluyendo los parámetros de la SWCC de Van Genuchten (1980), con ayuda de Hydrus ® se simuló la infiltración en 2-D combinando la posición en serie de las texturas de suelo. Se tienen espesores de 4,0 m, 3,0 m, 2,0 m y 1,0 m, cada uno dividido en tercios para combinar la posición de las texturas de suelo. La longitud de las modelaciones es de 15,0 m, tomando formas curvas inclinadas 15° respecto de la horizontal y formas rectangulares con inclinación 0° y 15° respecto de la horizontal (ver Figura 43). Las condiciones de frontera son: en la parte inferior impermeable, a la derecha flujo libre, a la izquierda y superficie con flujo y entrada constante de agua. La condición inicial del ejercicio es *cabeza de presión* $\psi = -100$ cm, para todas las texturas de suelo.

Los 3 suelos con los que se modeló la infiltración en las condiciones descritas anteriormente son: Arena francoso (**loamy sand**), Franco limoso (**silty loam**) y Franco arcilloso (**clay loam**). La combinación de posiciones de las 3 texturas y las formas trabajadas se muestra en la Figura 43; en total se modelaron 72 combinaciones, las cuales se encuentran en el *Apéndice Magnético*.

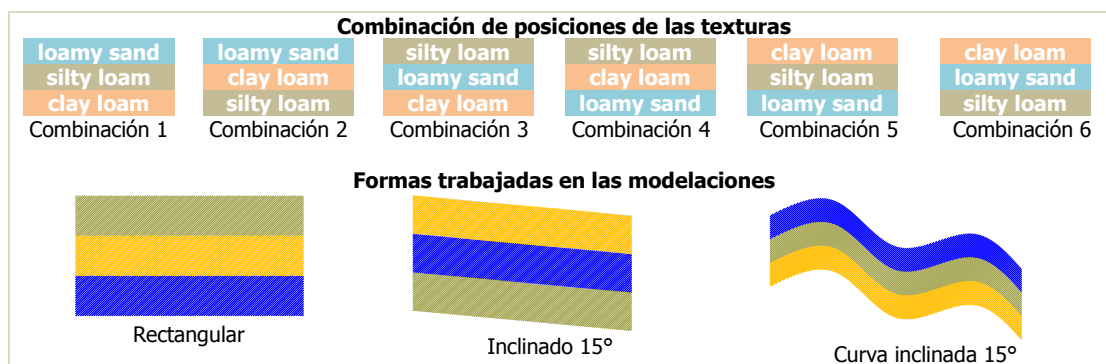


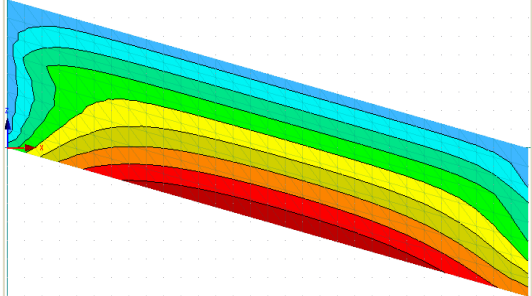
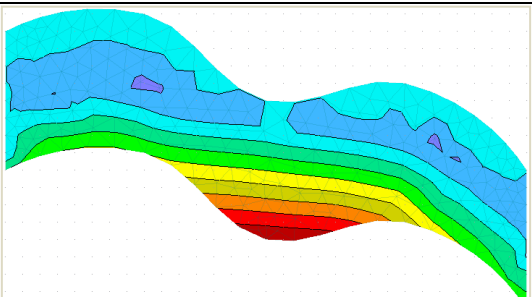
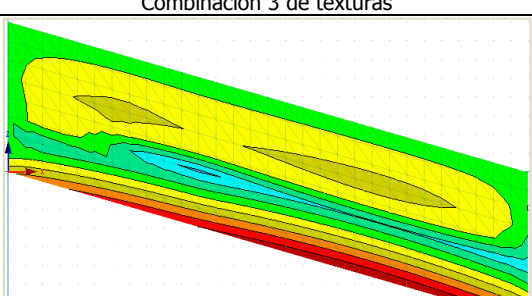
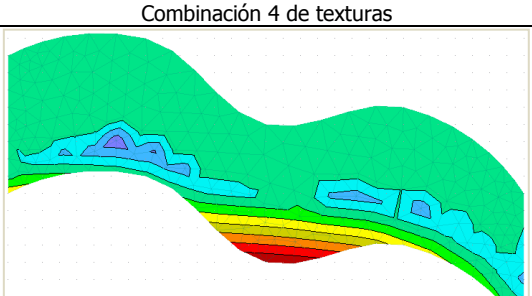
Figura 43. Combinaciones de posiciones de las 3 texturas y formas trabajadas en la simulación en 2-D para los 4 espesores de suelo.

En la Tabla 28 se presentan 4 esquemas de cabezas de presión, cada una luego del tiempo necesario para alcanzar los valores máximos de cabezas de presión ψ en el espesor modelado. Adicional a las observaciones consignadas en la Tabla 28, a continuación se presentan otras que permitirán complementar el análisis de las 72 modelaciones que se encuentran en el *Apéndice Magnético*.

Diferente a lo observado en las modelaciones con solo una textura de suelo, el comportamiento del conjunto de texturas varía dependiendo de la ubicación de las mismas y los tiempos necesarios para alcanzar la cabeza de presión ψ máxima varía en cada caso. La forma o geometría también influye en la distribución y valor de las máximas cabezas de presión ψ alcanzadas. Cuando la forma se combina con la distribución de las texturas, puede presentarse una acumulación de cabezas de presión ψ debido a la saturación. Esto

se aprecia mejor en las depresiones de las formas curvas cuando en el tercio inferior se ubica el suelo *Areno francoso*.

Tabla 28. Cabezas de presión ψ resultantes de algunas modelaciones, involucrando 3 texturas de suelo

Cabezas de presión ψ resultantes para 4 de las 72 modelaciones	Observaciones
 <p>Pressure Head - h [cm]</p> <p>Max : 364.885 Min : -102.403</p> <p>Combinación 2 de texturas</p>	<p>El tiempo total para la <i>combinación 1</i> de texturas (36 h) es casi la mitad del tiempo para la <i>combinación 2</i> de texturas (60 h), en las tres formas trabajadas, para 4,0 m de espesor (ver <i>Apéndice Magnético</i>).</p> <p>La diferencia de tiempos totales ha disminuido para las <i>combinaciones de texturas 3 y 4</i>, pero siguen siendo mayores cuando el suelo <i>Franco arcilloso</i> se ubica mas cerca de la superficie.</p>
 <p>Pressure Head - h [cm]</p> <p>Max : 305.609 Min : -117.443</p> <p>Combinación 3 de texturas</p>	<p>En las <i>combinaciones de texturas 5 y 6</i> nuevamente se ha incrementado la diferencia de tiempos totales, siendo mayor (50%) donde el suelo <i>Areno francoso</i> se encuentra en la parte inferior.</p> <p>La distribución de cabezas de presión ψ máximas mantiene aproximadamente la misma distribución para las 3 formas trabajadas con las primeras 2 combinaciones de texturas, pero en la forma curva para las 6 combinaciones de texturas concentra las cabezas de presión ψ máximas en la depresión central.</p>
 <p>Pressure Head - h [cm]</p> <p>Max : 110.427 Min : -104.139</p> <p>Combinación 4 de texturas</p>	<p>Las cabezas de presión ψ máximas en las formas curvas son mayores que en la rectangular inclinada y horizontal; esto puede deberse a que la depresión central se satura y acumula las ψ, mientras que en las cimas de las formas curvas los valores de ψ son mínimos.</p>
 <p>Pressure Head - h [cm]</p> <p>Max : 163.393 Min : -116.174</p> <p>Combinación 5 de texturas</p>	<p>Las cabezas de presión ψ máximas alcanzadas en las 6 combinaciones de texturas son diferentes.</p> <p>Los valores de tiempo total y cabezas de presión ψ alcanzadas en los espesores de 3,0 m, 2,0 m y 1,0 m corresponden proporcionalmente con los valores alcanzados para el espesor de 4,0 m. Las 72 simulaciones se encuentran consignadas en el <i>Apéndice Magnético</i>.</p>

La ubicación de las texturas es la variable que marca en gran medida el comportamiento de las cabezas de presión ψ dentro del espesor de suelo, en especial la ubicación de la

textura más gruesa o de mayor permeabilidad, que en este caso es suelo *Areno francoso*. Cuando el suelo *Areno francoso* se encuentra en la parte superior, en contacto directo con la atmosfera, las cabezas de presión ψ máximas se distribuyen en forma hidrostática aproximadamente, de forma similar a la distribución encontrada cuando se modeló una sola textura. Cuando el suelo *Areno francoso* se encuentra en el tercio inferior, las cabezas de presión ψ de mayor valor se distribuyen en el suelo *Areno francoso* y las cabezas de presión ψ menores se distribuyen en los 2 tercios superiores restantes. Cuando el suelo *Areno francoso* se ubica en el tercio central, la distribución de las cabezas de presión ψ trata de ser más equitativa en los tercios medio e inferior. En la Figura 44 se puede observar la variación de cabezas de presión ψ para los puntos de control ubicados coincidentemente en el centro de cada textura y cada tercio para las combinaciones 1 y 5 según la Figura 43; en el *Apéndice Magnético* se observan las 72 modelaciones completas.

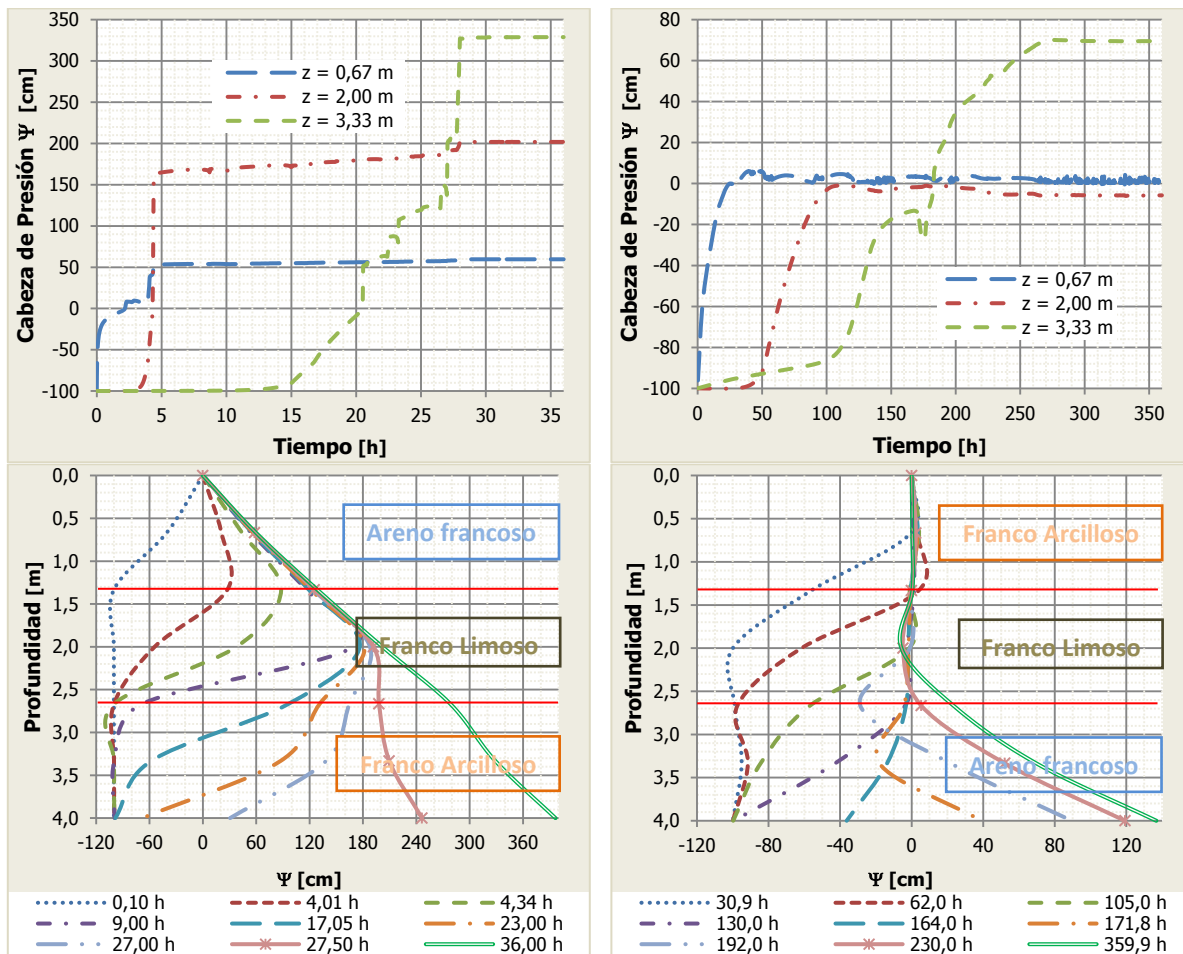


Figura 44. Combinación 1 de texturas, forma curva inclinada con espesor de 4,0 m: (izquierda superior) variación de Ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (izquierda inferior) variación de la profundidad z con Ψ para diferentes tiempos t .

Combinación 5 de texturas, forma curva inclinada con espesor de 4,0 m: (derecha superior) variación de Ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z , (derecha inferior) variación de la profundidad z con Ψ para diferentes tiempos t .

Cuando el suelo *Areno francoso* no se ubica en el tercio superior, en las otras 2 texturas se produce un efecto similar a una condición de frontera de flujo libre, de tal forma que a pesar de contar con tiempos de simulación muy grandes y estar saturados, se presentan valores de cabezas de presión ψ mucho más pequeñas que los observados cuando el suelo *Areno francoso* se encuentra en el tercio superior; cuando el suelo *Areno francoso* está en posición diferente del tercio superior, sigue experimentando altos valores de cabezas de presión ψ , debido a que los otros dos suelos tienen permeabilidades mucho más reducidas lo que limita la formación de una columna de agua a través de estos, encontrándose un efecto similar a las presiones artesianas en el suelo *Areno francoso*.

3.2.3 MODELACIÓN EN 2-D USANDO LOS UMBRALES DE LLUVIA

En este caso las modelaciones no tendrán infiltración a una tasa constante, esta actuará dependiendo de los valores de umbral fijados para cada caso.

3.2.3.1 Modelación en 2-D usando los umbrales de lluvia de Guzzetti

Usando Hydrus ®, en este caso se han tomado 3 texturas de suelo (Tabla 22), 17 combinaciones de intensidad y duración de lluvia y 3 condiciones iniciales de contenido volumétrico de agua, para un total de 153 simulaciones, como se observa en la Tabla 29. En todos los casos se trabajará una forma rectangular con espesor de 4,0 m, longitud de 15,0 m e inclinación de 15°, con las siguientes condiciones de frontera: en la parte inferior impermeable, a la derecha e izquierda flujo libre y en la parte superior entrada de agua lluvia en la intensidad y duración de la Tabla 29. Las simulaciones se realizaron iniciando con la intensidad y duración de lluvia de la Tabla 29, siguiendo sin infiltración alguna hasta completar 96 horas. En el *Apéndice Magnético* se observan los resultados de las 153 simulaciones.

Tabla 29. Combinaciones de datos para las 153 simulaciones usando los umbrales de Guzzetti

No.	Intensidad – Duración [cm/h] – [h]	Combinación de textura		
1	2,0 – 1,0	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="background-color: #808000; color: white; padding: 5px; margin-right: 10px;">Silty loam</div> <div style="text-align: center;">4 m</div> </div>	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="background-color: #4682B4; color: white; padding: 5px; margin-right: 10px;">Loamy sand</div> <div style="text-align: center;">2 m</div> </div>	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="background-color: #FF8C00; color: white; padding: 5px; margin-right: 10px;">Clay loam</div> <div style="text-align: center;">2 m</div> </div>
2	2,0 – 10,0			
3	2,0 – 70,0			
4	2,0 – 2,0			
5	3,0 – 2,0			
6	6,0 – 10,0			
7	6,0 – 30,0			
8	0,5 – 50,0			
9	1,0 – 50,0			
10	0,1 – 0,50	$\theta_i = 0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ $\theta_i = 0,23 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ $\theta_i = 0,40 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	$\theta_i = 0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ $\theta_i = 0,23 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ $\theta_i = 0,39 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	$\theta_i = 0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ $\theta_i = 0,23 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ $\theta_i = 0,39 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$
11	0,1 – 1,50			
12	0,08 – 5,0			
13	0,05 – 5,0			
14	0,05 – 10,0			
15	0,05 – 20,0			
16	0,03 – 50,0			
17	0,04 – 50,0			

En la Tabla 29, los 9 primeros datos de $I - D$ corresponden con valores susceptibles para iniciar deslizamientos, mientras que los 8 últimos corresponden con valores no susceptibles para iniciar deslizamientos, según la Figura 37 (izquierda); los resultados más notables de las 153 simulaciones en cuanto a cabeza de presión ψ se presentan en las Figuras 45, 46 y 47.

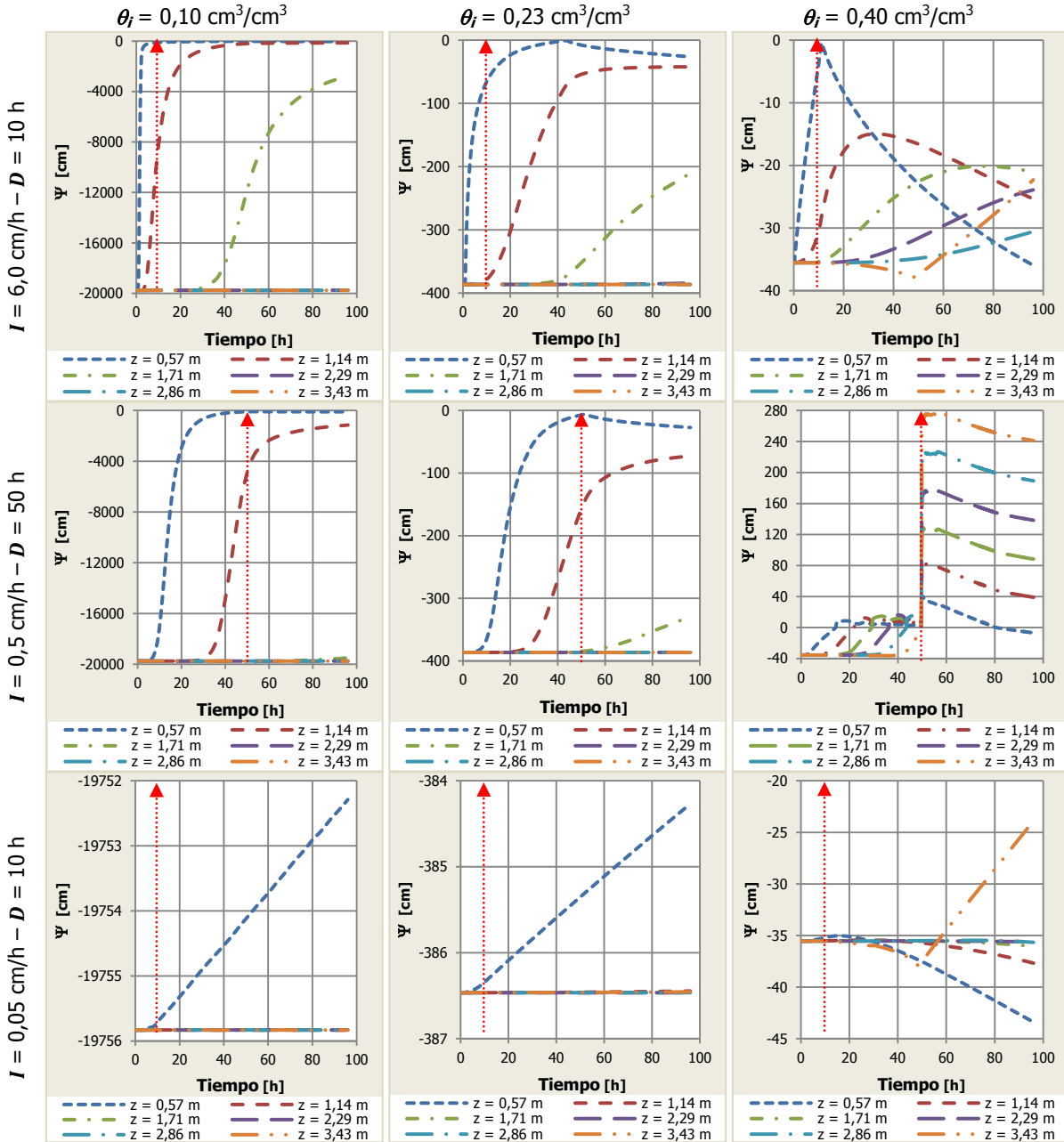


Figura 45. Variación de Ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z para suelo de textura *Franco limoso* (*silty loam*), con tres valores de $I - D$ y tres condiciones de θ_i .

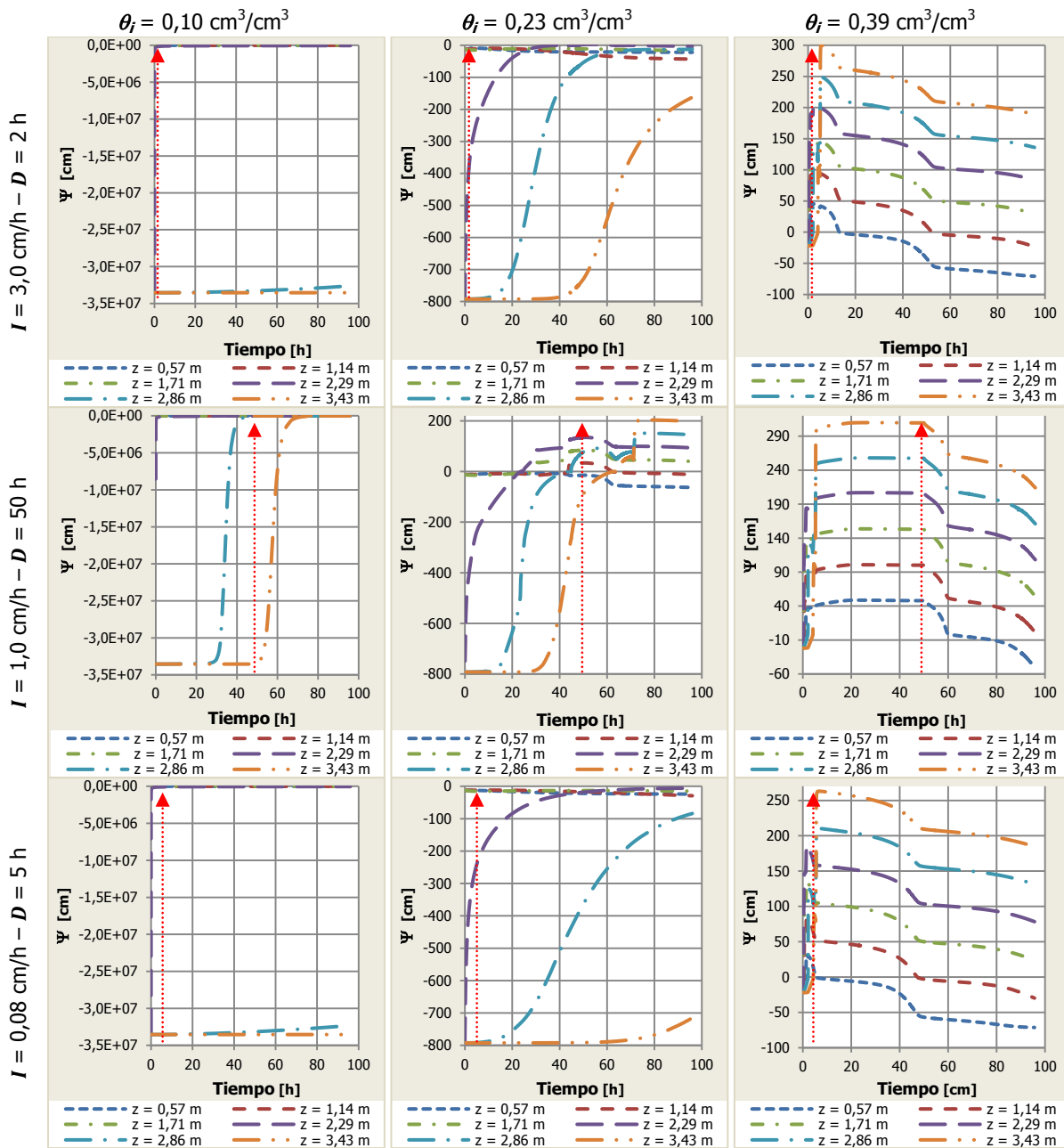


Figura 46. Variación de Ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z para suelos de textura *Areno francoso/Franco arcilloso* (loamy sand/clay loam), con tres valores de $I - D$ y tres condiciones de θ_i .

Luego de realizar las 153 simulaciones con la combinación de datos de la Tabla 29 y observando los resultados obtenidos (ver *Apéndice Magnético*), se realizan las siguientes consideraciones:

- Se evidencia la influencia del contenido volumétrico de agua inicial θ_i en las cabezas de presión ψ . Se observa un retardo en la respuesta hídrica del suelo que depende de θ_i . En las Figuras se muestra que luego de cesar la lluvia, las cabezas

de presión ψ disminuyen en valor, debido a que el proceso de infiltración termina en superficie y la humedad presente en el suelo profundiza su posición.

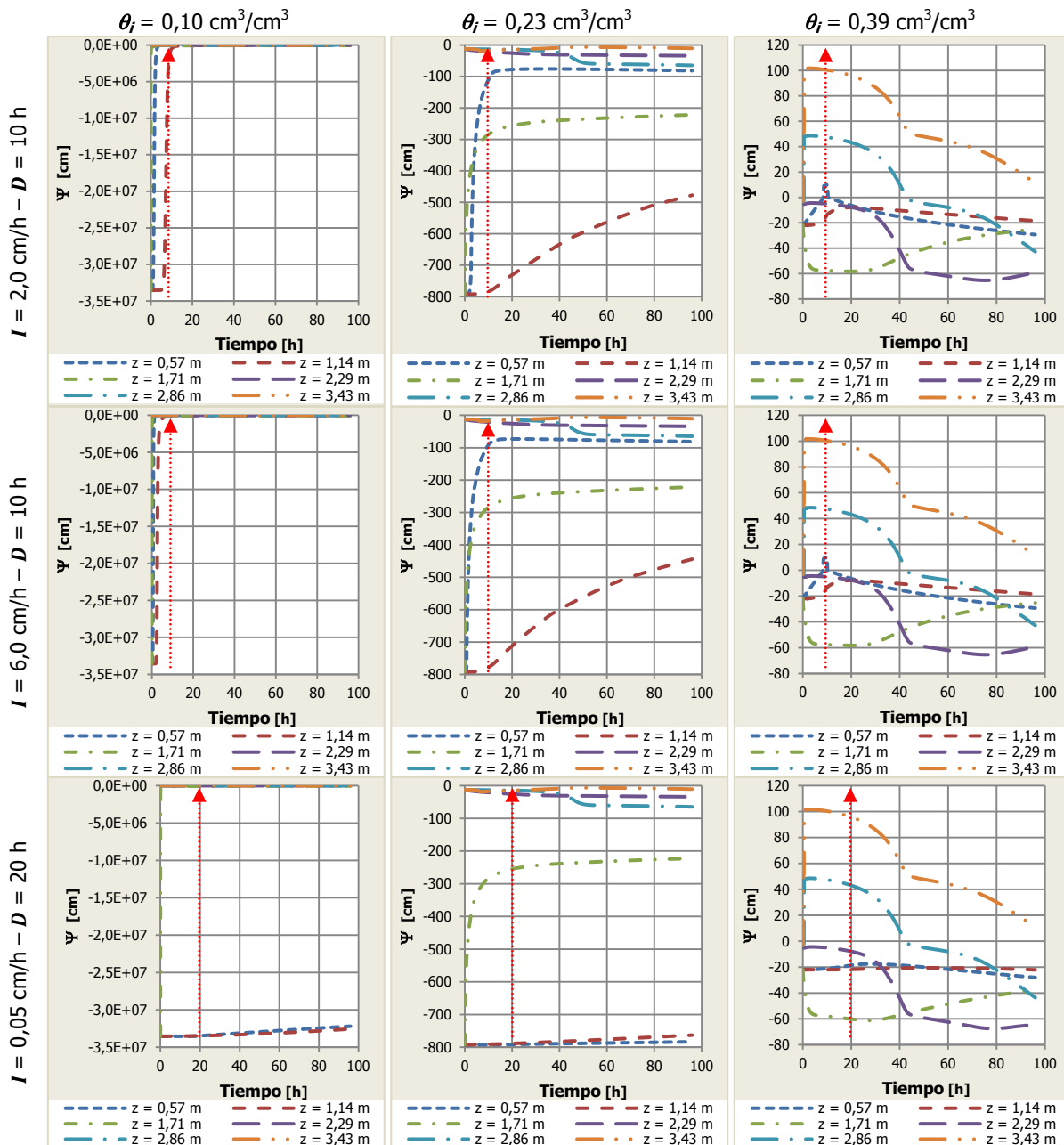


Figura 47. Variación de Ψ con el tiempo t a diferentes profundidades z para suelos de textura *Franco arcilloso/Areno francoso* (clay loam/loamy sand), con tres valores de $I - D$ y tres condiciones de θ_i .

- El contenido volumétrico de agua inicial θ_i influye en la respuesta hídrica del suelo, puesto que con θ_i bajos o intermedios (0,10 y 0,23) no se registran incrementos de cabezas de presión notables *en todo el espesor del suelo*, mientras que con valores cercanos a la saturación de θ_i (0,39 y 0,40) se observa que el suelo si registra

notables cambios en las cabezas de presión en todo su espesor. La primera columna que corresponde con $\theta_i = 0,10$, evidencia que los incrementos de las cabezas de presión ψ no son susceptibles de producir deslizamientos. La segunda columna, cuyo $\theta_i = 0,23$, muestra claramente más posibilidades de producir deslizamientos, debido a su mayor nivel de saturación y mayores valores de cabezas de presión ψ iniciales. La columna correspondiente a $\theta_i = 0,39/0,40$, muestra claramente el potencial de producir deslizamientos, debido a que se encuentra con más saturación y cuenta con cabezas de presión ψ iniciales más grandes, inclusive para las combinaciones de $I - D$ clasificadas como no susceptibles de producir deslizamientos, según la ecuación 4 de la Tabla 25 y la Figura 37. Los valores de $I - D$ de la Tabla 29 agrupados como susceptibles o no de iniciar deslizamientos, según las consideraciones anteriores obedecen fundamentalmente al nivel de saturación.

- Tomando en cuenta las gráficas que se muestran en el *Apéndice Magnético*, se evidencia que cada una de las combinaciones de *Intensidad – Duración* produce un efecto diferente en las tres combinaciones de texturas. Las texturas de suelo también influyen de forma importante en la respuesta hídrica del mismo; los suelos de textura fina (*franco limoso* y *franco arcilloso*) se muestran más influenciados por duraciones D largas (> 30 h) pero con intensidades $I > 0,5$ cm/h, mientras que los suelos de textura gruesa (*areno francoso*) aumentan las cabezas de presión siempre y cuando tengan flujo constante, es decir se presente infiltración, sin importar la combinación $I - D$. Para una misma combinación de $I - D$ se observan comportamientos diferentes, obedeciendo a lo descrito anteriormente.
- Para que se presente un aumento notable en las cabezas de presión debe formarse una columna de agua, para lo cual el suelo debe llenarse de agua e interconectar sus vacíos. Cada textura de suelo lo realiza con diferentes tiempos y se influencia, como ya se ha descrito, por unos rangos de duración e intensidad de lluvia diferentes. La textura gruesa (*areno francoso*) es la que presenta mayor permeabilidad y por lo tanto menor tiempo de reacción frente a la infiltración y mayor facilidad en formar columnas de agua, pero poca capacidad de almacenamiento de humedad; mientras que las texturas finas presentan más capacidad de almacenamiento de humedad pero requieren mucho más tiempo en formar una columna de agua y requieren mucho tiempo en su respuesta hídrica.
- En el *Apéndice Magnético*, se observa que la ubicación de la textura gruesa influencia ampliamente el tiempo de respuesta y el aumento de las cabezas de presión, mientras que las texturas finas sostienen por más tiempo los valores de cabezas de presión alcanzadas, disipándolas lentamente. La combinación de texturas *areno francoso/franco arcilloso* presenta un comportamiento asimilable al presentado por el suelo de una sola textura *franco limosa*, debido a que en los dos casos se puede formar una columna de agua en todo el espesor de suelo, mientras que en la combinación *franco arcilloso/areno francoso* no se puede formar una columna de agua debido a la poca capacidad de almacenamiento del suelo *areno francoso* y a la baja conductividad hidráulica del suelo *franco arcilloso*.

- Según las modelaciones presentadas en este numeral y en el *Apéndice Magnético*, se observa que la textura fina presenta menor actividad en el movimiento del agua dentro del suelo, si se compara con la textura gruesa. En general el comportamiento observado con la combinación de las dos texturas se asimila en gran proporción a lo observado en las simulaciones del numeral 3.2.2.
- La intensidad de la lluvia es un factor importante para la saturación del suelo y profundización del frente húmedo, pero quien más aporta es la duración de la lluvia. Cuando se trabaja con valores de θ_r cercanos al residual o intermedio (0,10 y 0,23), una vez termina la lluvia se observa que el suelo procura retener humedad y tarda mucho más en permitir su descenso o salida, mientras que valores de θ_r cercanos a la saturación permiten más rápido lo descrito anteriormente. Esto concuerda con la teoría, la cual plantea una relación entre la conductividad hidráulica del suelo y su nivel saturación, alcanzando la máxima conductividad hidráulica cuando el suelo se encuentra saturado y la succión matricial es mínima o nula.

3.2.3.2 Modelación en 2-D con umbrales de lluvia evento – lluvia acumulada

Tomando en cuenta la ecuación (60) y los valores de precipitación promedio anual (*ppa*) reportados por Castellanos y González (1997) se calculan valores de lluvia acumulada (*Llac*) y duración crítica acumulada (*Dac*); luego se usarán los umbrales de lluvia evento (*Llev*) y lluvia acumulada (*Llac*) consignados en la Tabla 26 y Figura 34 propuestos por Mayorga (2003) y con estos se modela con Hydrus ®. En la Tabla 30 se presentan los valores resultantes de los cálculos realizados.

Tabla 30. Valores de lluvia propuestos para modelar *Llev - Llac*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No	<i>ppa</i> [mm]	<i>Llac</i> [mm]	<i>Dac</i> [días]	<i>Iprom.</i> [cm/d]	Localización	Grupo	<i>Llev</i> * [cm]	<i>Llev</i> ** [cm]	<i>Ilev-Dev</i> *** [cm/h-h]
1	6747,3	2817	93	3,029	Qda La Chiva, N. de S.	1	0,0	15,0	0,01-8,0
2	5012,5	2106	82	2,568	Chirajara, Cundinamarca	3	0,0	12,7	-
3	2760,3	1183	64	1,848	Chiropotó, Antioquia	2	0,0	0,0	-
4	777,7	370	40	0,925	La Chapa, Boyacá	1	15,0	1,8	7,5-2,0

* Según Mayorga (2003). ** Reportado por Castellanos y González (1997). *** Intensidad y Duración del evento adoptado para este estudio.

En este caso solo se simulan las lluvias correspondientes a las filas 1 y 4. Inicialmente se toman los valores de la columna 4 y 5 (Intensidad promedio *Iprom.* y duración crítica acumulada *Dac*), se deja transcurrir un periodo sin lluvia de 2 días y luego se trabaja con los valores de la columna 10 como representativos de la lluvia del evento *Llev*.

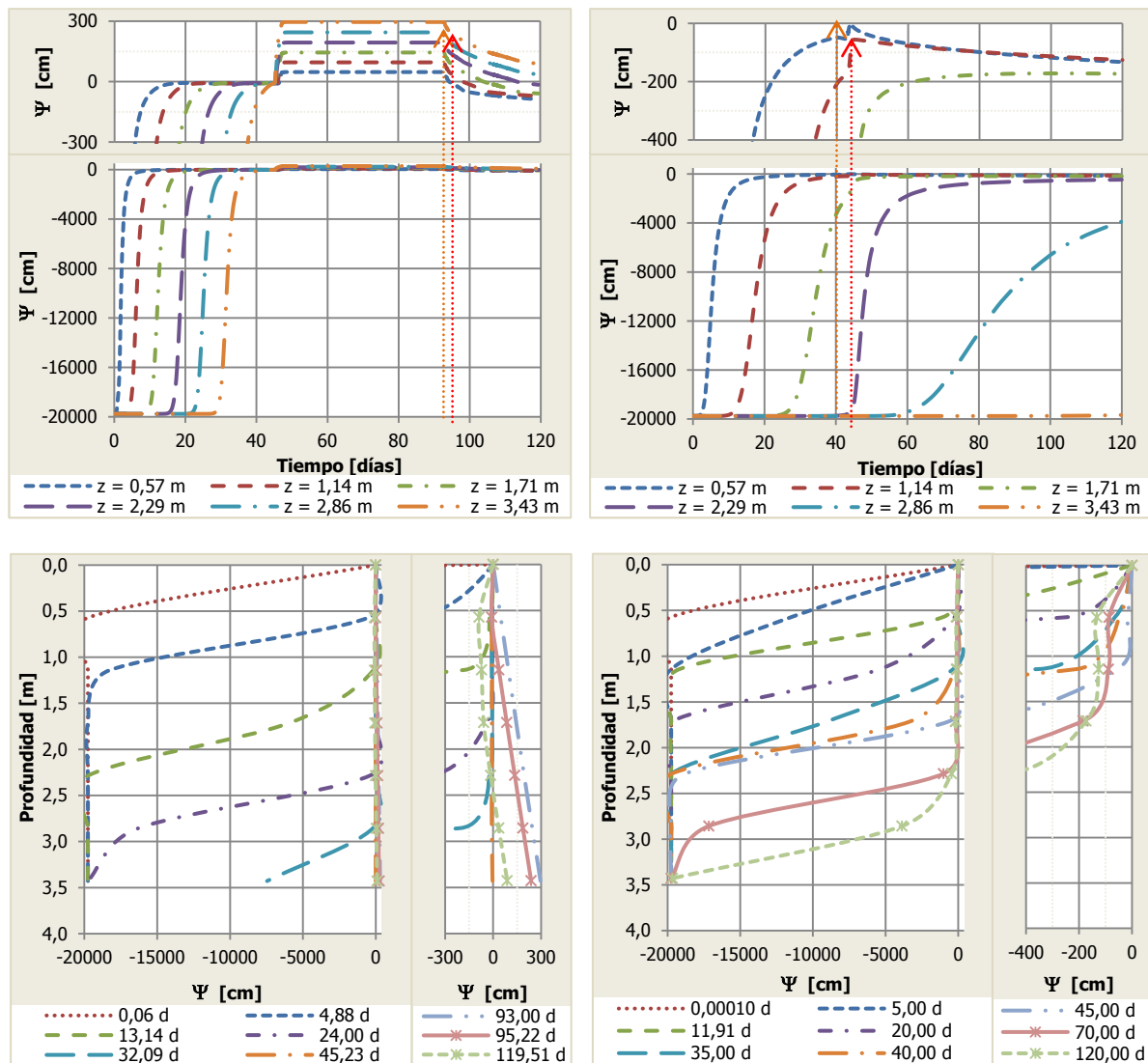


Figura 48. Variación de Ψ en un suelo de textura *Franco limoso* (*silty loam*), modelación para 2 casos de *Llev - Llac*.

(Izquierda) $Llac = 2817 \text{ mm}$ (**3,029 cm/día – 93 días**), $Llev = 0,8 \text{ mm}$ (**0,01 cm/h – 8 horas**),
 (derecha) $Llac = 370 \text{ mm}$ (**0,925 cm/día – 40 días**), $Llev = 150 \text{ mm}$ (**7,5 cm/h – 2 horas**).

Usando Hydrus [®], se toman las texturas de suelo del numeral anterior y su geometría; se simulan 2 combinaciones de *Llev - Llac* con condición inicial de $\theta_i = 0,10$ para todos los casos, con las siguientes condiciones de frontera: en la parte inferior impermeable, a la derecha e izquierda flujo libre y en la parte superior entrada de agua lluvia. En las Figuras 48, 49 y 50 se presentan modelaciones con solo una textura de suelo: *Franco limoso*, *Areno francoso* y *Franco arcilloso*, respectivamente. En el *Apéndice Magnético* se presentan las modelaciones de los mismos casos, pero con condición inicial de $\theta_i = 0,23$ y $\theta_i = 0,39/0,40$, incluyendo también los mismos casos solo con lluvia evento *Llev*.

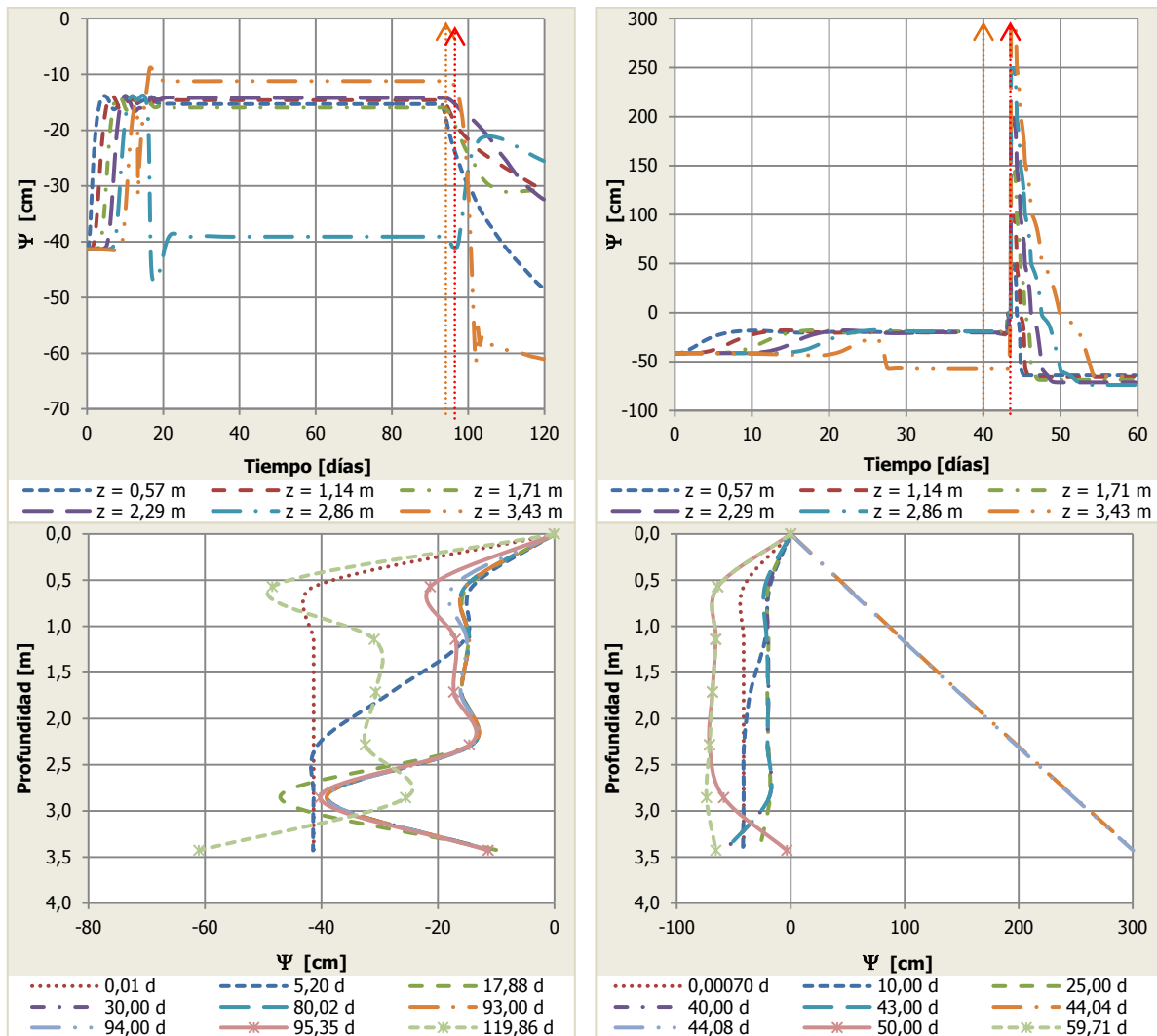


Figura 49. Variación de Ψ en un suelo de textura *Areno francoso* (*loamy sand*), modelación para 2 casos de $L_{lev} - L_{lac}$.

(Izquierda) $L_{lac} = 2817$ mm (**3,029 cm/día – 93 días**), $L_{lev} = 0,8$ mm (**0,01 cm/h – 8 horas**),
(derecha) $L_{lac} = 370$ mm (**0,925 cm/día – 40 días**), $L_{lev} = 150$ mm (**7,5 cm/h – 2 horas**).

Las simulaciones, que en total suman 60 en el *Apéndice Magnético*, se realizan para un tiempo determinado incluyendo duración acumulada, duración del evento y períodos adicionales de no lluvia. El resultado de las simulaciones para $\theta_i = 0,10$ y dos L_{lac} se observan en las Figuras 48, 49, 50, 51 y 52. Los dos valores de $L_{lev} - L_{lac}$ trabajados, tratan de simular dos extremos para estos umbrales, modelando valores grandes de L_{lac} seguidos por valores bajos de L_{lev} y pequeños valores de L_{lac} seguidos con grandes valores de L_{lev} . A continuación se presentan algunas conclusiones de las simulaciones:

- Se presentan cambios más notorios en las cabezas de presión ψ y más rápidos cuando se tienen L_{lac} más grandes comparados con L_{lac} pequeñas. La L_{lac} pequeña no alcanza a infiltrar todo el espesor modelado, mientras que la L_{lac}

mayor sí lo hace. La distribución de ψ con la *Llac* menor se muestra menos alterada al cesar la misma, si se compara con la *Llac* mayor.

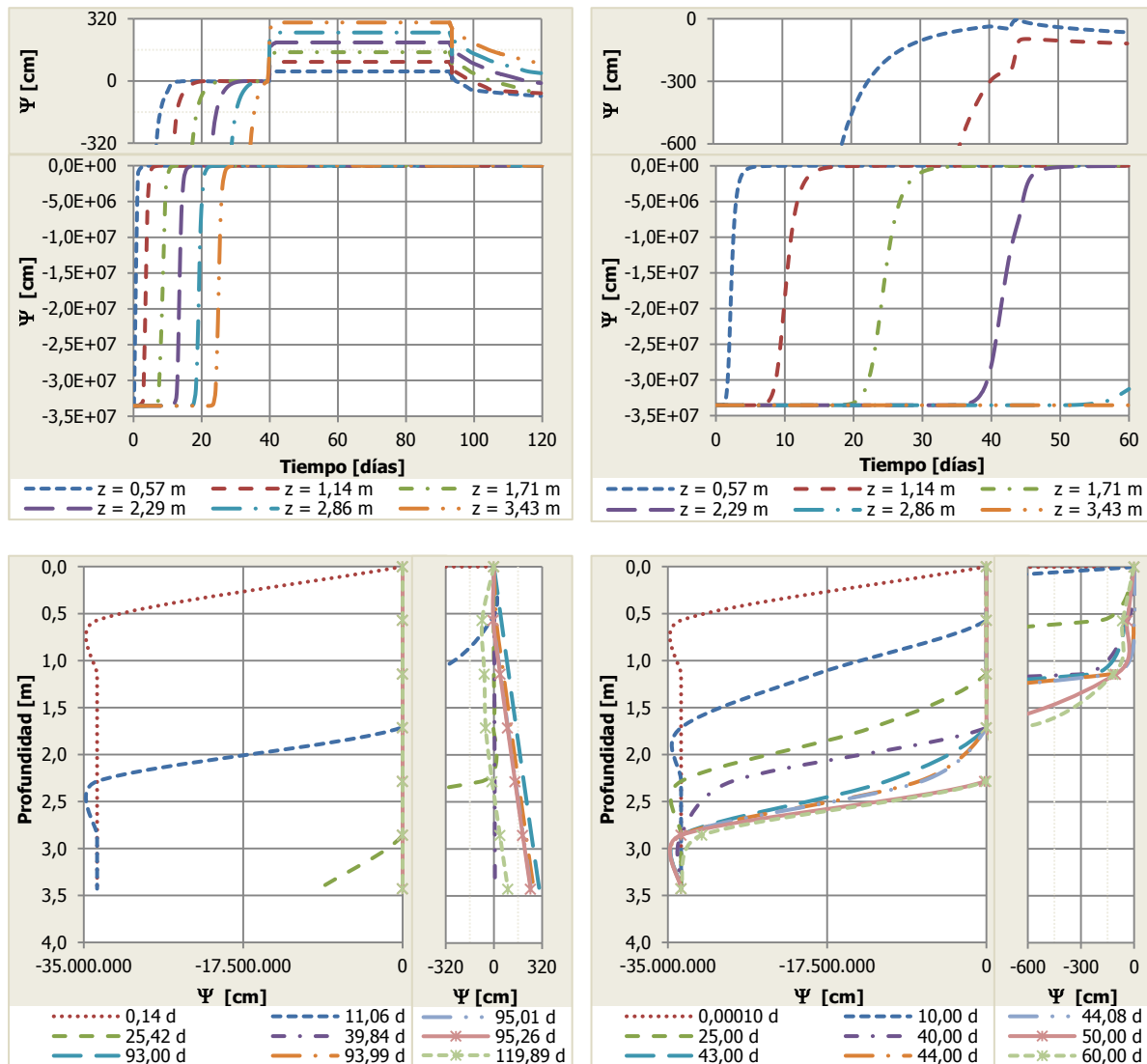


Figura 50. Variación de Ψ en un suelo de textura *Franco arcilloso* (*clay loam*), modelación para 2 casos de *Llev - Llac*.

(Izquierda) *Llac* = 2817 mm (3,029 cm/día - 93 días), *Llev* = 0,8 mm (0,01 cm/h - 8 horas),
(derecha) *Llac* = 370 mm (0,925 cm/día - 40 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h - 2 horas).

- La *Llev* aunque presenta influencia notoria en la cabeza de presión ψ , como se aprecia en el lado derecho de las Figuras 48, 49, 50, 51 y 52, no produce gran influencia en tiempos cortos o medianos en suelos de textura fina a media (*Franco arcilloso* a *Franco limoso*), pero en texturas gruesas (*Areno francoso*) sí produce un efecto notorio inmediato. Lo anterior se debe a que no se infiltra toda la lluvia para gran parte de la *Llev* grande, puesto que la cantidad de

lluvia infiltrada en el suelo es función de su textura, θ y K_s . Cuando la $Llev$ es pequeña la gran mayoría de lluvia se infiltra en el suelo.

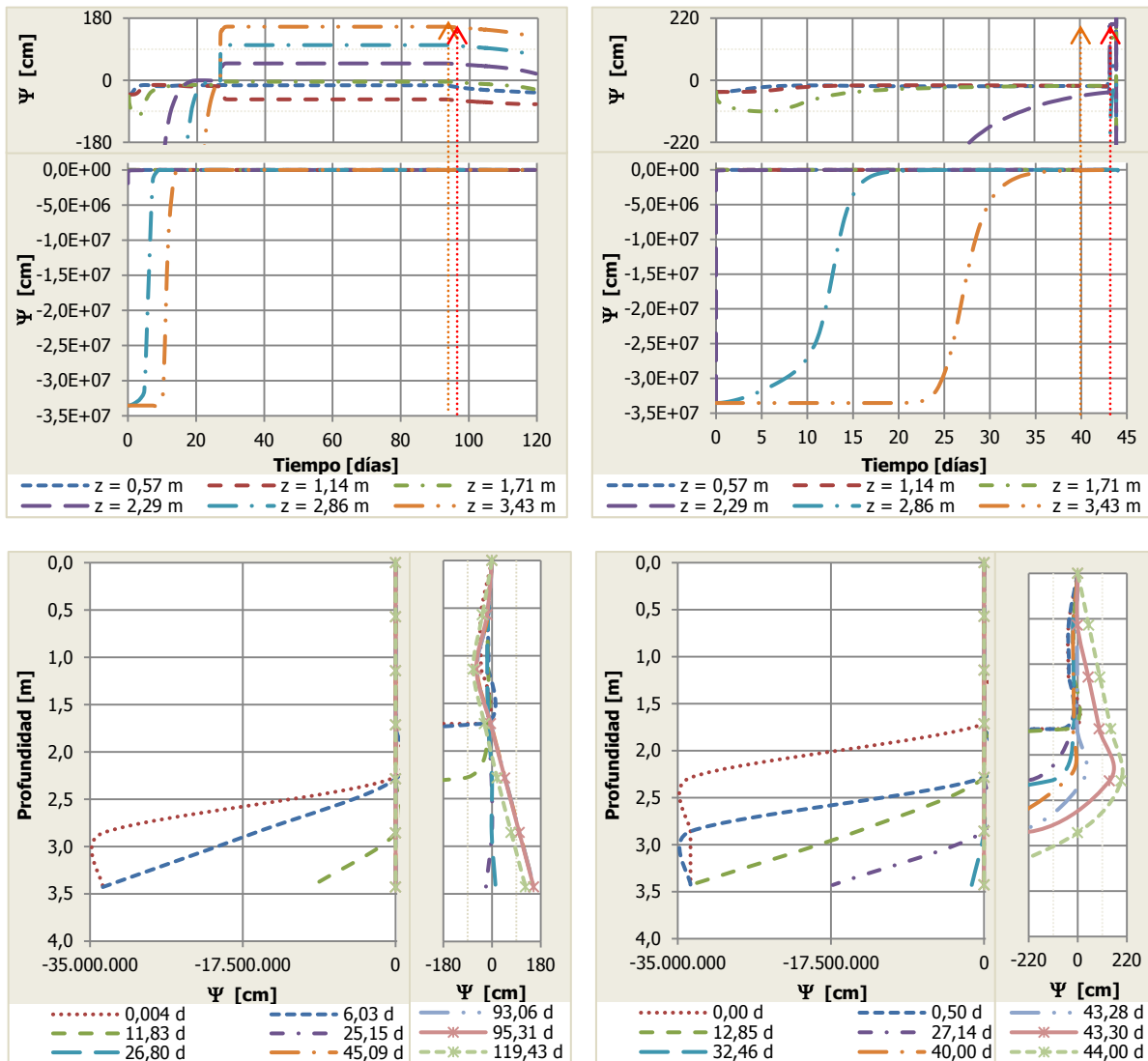


Figura 51. Variación de Ψ en dos suelos de textura *Arena francoso/Franco arcilloso* (loamy sand/clay loam), modelación para 2 casos de $Llev - Llac$.

(Izquierda) $Llac = 2817$ mm ($3,029$ cm/día - 93 días), $Llev = 0,8$ mm ($0,01$ cm/h - 8 horas),
(derecha) $Llac = 370$ mm ($0,925$ cm/día - 40 días), $Llev = 150$ mm ($7,5$ cm/h - 2 horas).

- Con los dos valores de $Llev - Llac$ se puede saturar el suelo, por lo menos hasta cierta profundidad, en tiempos relativamente cortos, sobre todo en las texturas gruesa e intermedia.

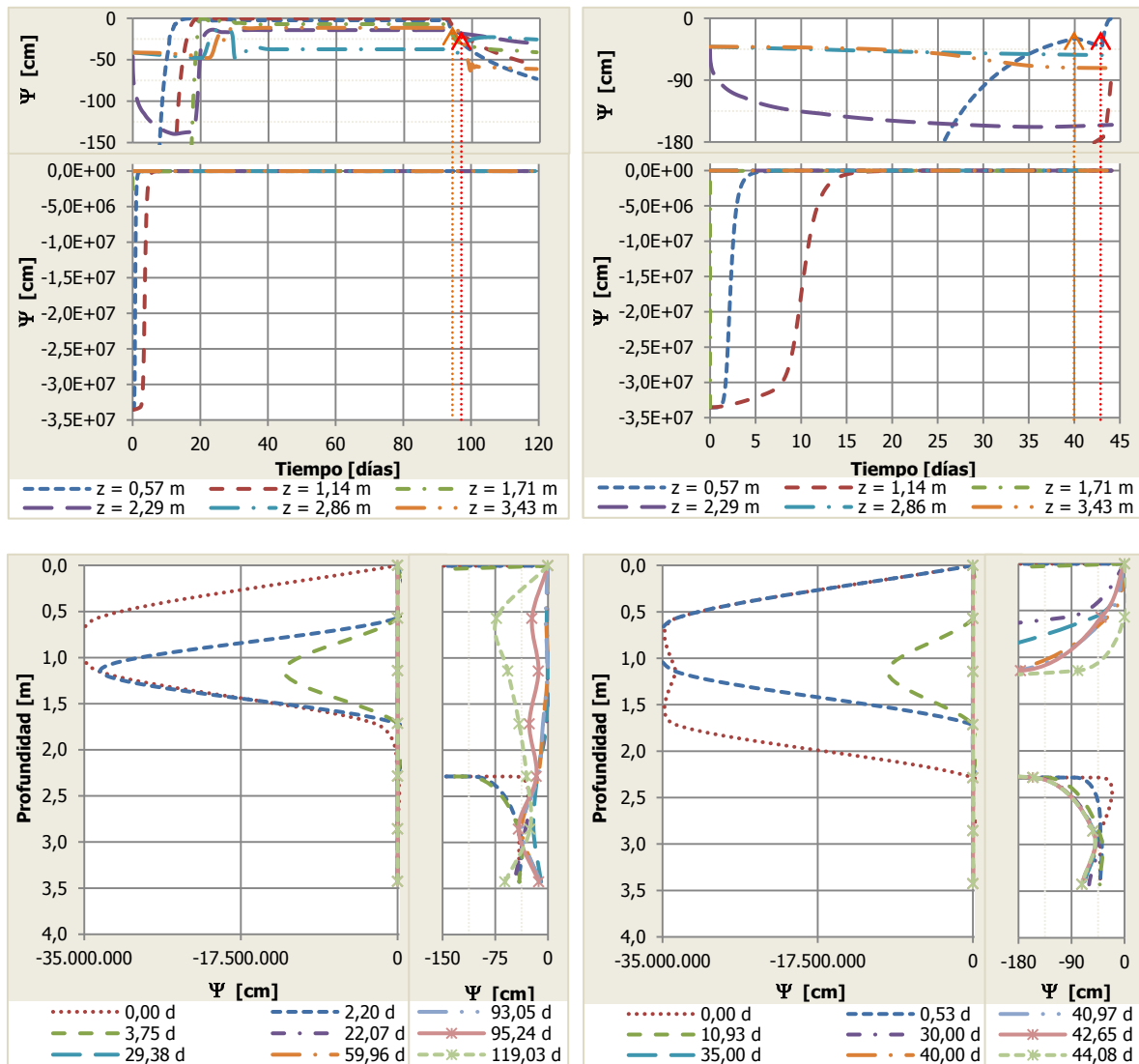


Figura 52. Variación de Ψ en dos suelos de textura *Franco arcilloso/Areno francoso* (clay loam/loamy sand), modelación para 2 casos de $L_{lev} - L_{lac}$.

(Izquierda) $L_{lac} = 2817 \text{ mm}$ (**3,029 cm/día - 93 días**), $L_{lev} = 0,8 \text{ mm}$ (**0,01 cm/h - 8 horas**),

(derecha) $L_{lac} = 370 \text{ mm}$ (**0,925 cm/día - 40 días**), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ (**7,5 cm/h - 2 horas**).

- En la combinación de texturas, la ubicación del suelo con textura más gruesa determina un rápido incremento de cabezas de presión ψ y transmisión al siguiente estrato, mientras que la de textura fina retarda este efecto para el estrato subyacente y si el estrato subyacente no tiene otro sistema de recarga, por mayores que sean los valores de $L_{lev} - L_{lac}$, hasta que el suelo con textura fina no se sature, el estrato subyacente perderá humedad conforme sea la geometría.
- Como se puede observar en las Figuras 48 a 52 lado izquierdo, cuando el suelo se satura y forma la columna de agua dentro del mismo, se produce el incremento de cabeza de presión hasta que cesa la L_{lac} . La disipación de cabezas de presión se

realiza en más o menos tiempo según sea la textura de suelo (textura fina más tiempo, textura gruesa menor tiempo). En el costado derecho de las mismas Figuras se puede observar el efecto que produce la **LLev** en las diferentes texturas de suelo, siendo la textura gruesa la que evidencia los mayores incrementos de cabeza de presión y los de textura más fina evidencia menores incrementos.

- Según las Figuras que se encuentran en el Apéndice Magnético, comparando las gráficas con diferentes θ_i (0,10, 0,23 y 0,39/0,40) se puede observar su influencia en las texturas y en los tiempos de respuesta del suelo. Los suelos de textura fina retienen humedad por lo que la disipación de cabezas de presión se realiza en más tiempo que en los suelos de textura gruesa, en los cuales se realiza en menos tiempo. También se puede observar que en los suelos de textura gruesa para las tres condiciones iniciales de θ_i se presenta disminución de las cabezas de presión durante la **Llac** y solo se presentan incrementos con grandes **LLev**.
- Realizando una comparación de las Figuras que se observan en el *Apéndice Magnético* de las modelaciones cuando se tiene y no se tiene **Llac**, se evidencia la influencia de la **Llac** debido a que ésta ayuda a conservar la humedad dentro del suelo, no permitiendo un descenso tan marcado en las cabezas de presión si se coteja con las modelaciones que no cuentan con **Llac**. En general, la **Llac** ejerce mayor influencia en los suelos finos debido a que éstos almacenan el agua infiltrada, mientras que los suelos de textura gruesa sin importar si se tiene **Llac** muestran la gran influencia que sobre ellos ejerce la **LLev** al incrementar las cabezas de presión de forma casi inmediata.

3.3 MODELACIÓN EN 3-D

Siguiendo los principios de la modelación en 2-D, con Hydrus ® se modelarán nueve formas de taludes en 3-D siguiendo la misma metodología del numeral 3.2.3.2 y las dos combinaciones de umbrales de lluvia acumulada (**Llac**), lluvia evento (**LLev**) resaltados en la Tabla 30 (filas 1 y 4). Nueve formas de laderas que se muestran en la Figura 53, representan las geoformas básicas que combinadas entre sí componen todas las formas posibles de laderas o taludes, según lo reporta Parsons (1988).

Debido a las limitaciones que Hydrus ® presenta cuando se modela lluvia para grandes períodos de tiempo en 3-D, se hace necesario aproximar los valores de θ y ψ al final del período de lluvia acumulada (**Llac**) modelando en 2-D las 2 **Llac** trabajadas y luego modelar 6 días en 3-D (los 3 días finales de **Llac**, seguidos por 2 o 3 días de no lluvia y **LLev**), para conocer la influencia de la **LLev** en la modelación efectuada en 3-D. La modelación en 2-D se ha realizado incluyendo los periodos de **Llac**, periodos de no lluvia y **LLev**, cuyos resultados respecto de **LLev** son similares a los obtenidos en 3-D.

Para modelar las 9 geoformas en 3-D, primero se modelarán 3 formas en perfil (planar, convexo y cóncavo), es decir primero se modelarán en 2-D, partiendo de condición inicial de $\theta_i = 0,10$ y las siguientes condiciones de frontera: impermeable en la parte inferior e izquierda, y condición atmosférica (entrada y salida de flujo de agua o lluvia) en la parte

superior y talud (derecha). En 3-D las 9 formas de laderas se modelarán con las siguientes condiciones de frontera: impermeable en la parte inferior, atrás, derecha e izquierda, y condición atmosférica (entrada y salida de flujo de agua o lluvia) en la parte superior y frente (geoformas). La pendiente adoptada para modelar los taludes será de 2:1 (H:V) (ángulo con la horizontal aprox. de $26,565^\circ$) en cada geoforma, en la parte frontal. Las demás caras serán rectas (superior, inferior, izquierda, derecha y atrás) Las dimensiones en 3-D serán: ancho = 10,0 m (dirección y), largo = 20,0 m (dirección x) y alto = 4,0 m (dirección z), para cada una de las 9 geoformas.

En los numerales anteriores se ha mostrado el efecto de la combinación de dos y tres texturas en el estudio de la infiltración dentro del suelo, en este caso se trabajará sin combinar texturas de suelo, modelando sólo con una textura. El material adoptado para estas modelaciones será *Franco limoso (silty loam)* y *Areno francoso (loamy sand)*, cuyos parámetros hidráulicos se encuentran consignados en la Tabla 22. Estos dos suelos representan dos texturas diferentes, siendo el *Areno francoso* un suelo con alta permeabilidad y el *Franco limoso* un suelo con permeabilidad mucho más baja. Lo anterior reflejará la influencia del tipo de suelo en la respuesta hídrica del mismo, puesto que la rapidez en su respuesta y la capacidad de acumulación de agua lluvia serán fundamentales para la evaluación de diversos aspectos.

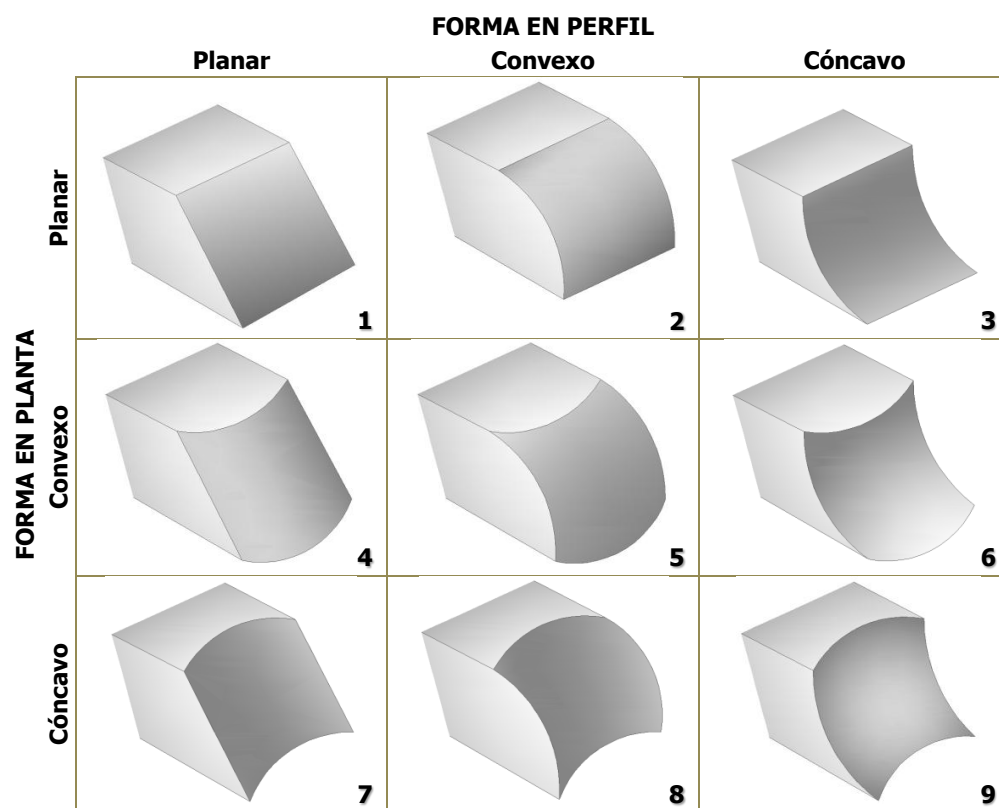


Figura 53. Nueve formas básicas para unidades de laderas (Adaptado de Parsons, 1988)

3.3.1 MODELACIONES EN 2-D DE LAS 3 FORMAS EN PERFIL

Como ya se ha mencionado, primero se modelarán los umbrales de infiltración en 2-D partiendo de $\theta_i = 0,10$, para las 3 formas en perfil básicas. En las Figuras 54 y 55 se observan los valores de cabezas de presión ψ 3 días antes de completarse la *Llac*, para las combinaciones de *Llac* – *Llev* resaltadas en la Tabla 30.

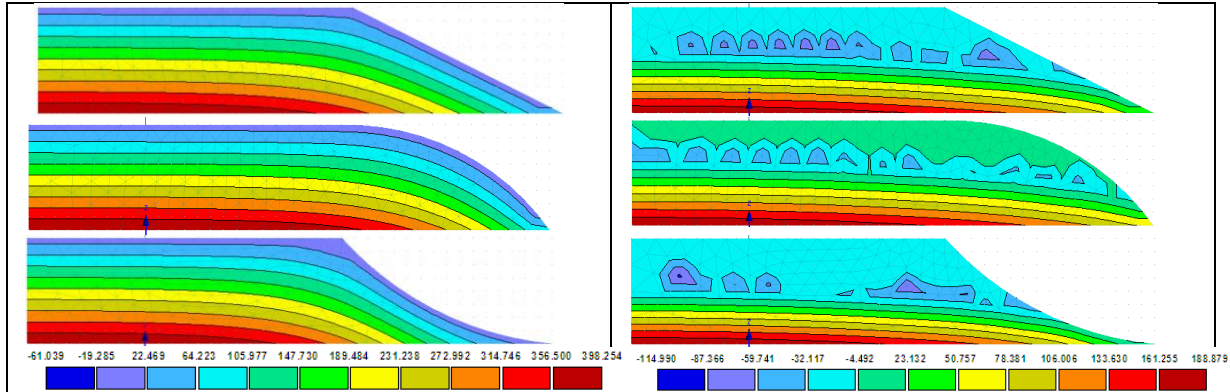


Figura 54. Valores de ψ alcanzados luego de 90 días de *Llac* = 3,029 cm/d. Escalas para ψ en cm. (Izquierda) *Franco limoso*. (Derecha) *Arena francoso*.

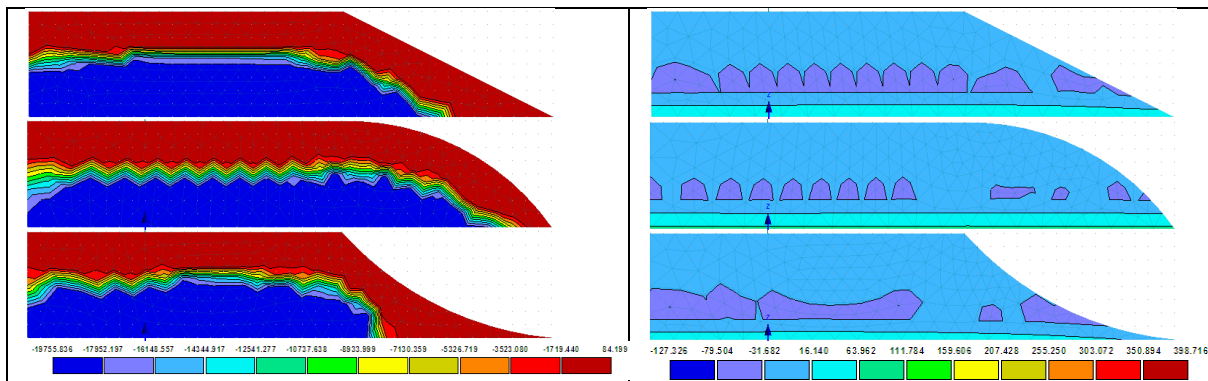


Figura 55. Valores de cabezas de presión ψ alcanzados luego de 37 días de *Llac* = 0,925 cm/d. Escalas para ψ en cm. (Izquierda) *Franco limoso*. (Derecha) *Arena francoso*.

Como se puede observar en las Figuras 54 y 55, la distribución y valores de cabezas de presión ψ son diferentes para el suelo de textura *Arena francoso* y *Franco limoso*, cuando los dos se someten a las mismas condiciones de lluvia en el mismo período de tiempo. El *Arena francoso* presenta un rango menos amplio en la variación de cabezas de presión.

La forma de los taludes (cóncavo, convexo y planar) influye en la distribución de cabezas de presión; en la horizontal zona antes de comenzar el talud, que tiene la misma geometría en todos los casos, se observan distribuciones de cabezas de presión similares para las tres formas en perfil, mientras que para las zonas de taludes se tienen distribuciones de cabezas de presión semejantes a la forma del talud en perfil. Lo anterior se presenta en las tres texturas de suelo modeladas.

3.3.2 MODELACIONES EN 3-D DE LAS 9 FORMAS BÁSICAS DE PARSONS

Cada uno de los perfiles en 2-D, corresponde a 3 geoformas en planta, según se observa en la Figura 53. Luego de alcanzar los valores de ψ de las Figuras 54 y 55, en 3-D se modelaron los umbrales resaltados de la Tabla 30 como se ha descrito anteriormente en el numeral 3.3, completando 36 modelaciones 3-D en total. A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos en las modelaciones 3-D, Figuras 56 y 57.

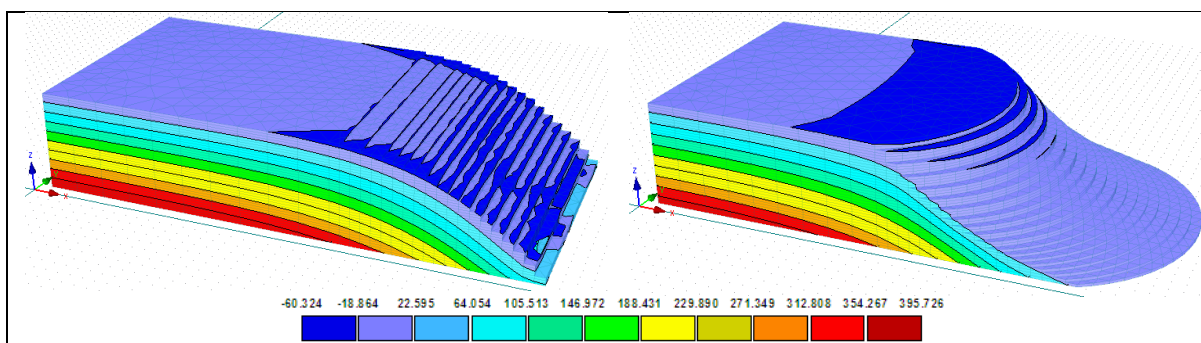


Figura 56. Valores de ψ alcanzados para $Llac = 3,029$ cm/d (90 días 2-D + 3 días 3-D), con las Formas Básicas No. 2 (izquierda) y No. 6 (derecha), según Parsons (1988) (Figura 53). Suelo de textura *Franco limoso*. Escalas para ψ en cm.

Según los resultados de las modelaciones en 3-D para las 9 Formas Básicas de Parsons (1988), la distribución de cabezas de presión ψ depende de su forma en perfil más que su forma en planta, lo que sugiere que en este caso, deslizamientos superficiales inducidos por infiltración, la forma en perfil induce la distribución de cabezas de presión ψ en el volumen de suelo. De las modelaciones realizadas es posible crear 3 grupos dependiendo de la distribución de ψ en perfil y de esta forma compararlos con las mismas formas en perfil modeladas en 2-D; un ejemplo de esta agrupación se puede observar en la Figura 57.

La distribución de cabezas de presión ψ es semejante en 2-D y 3-D, al igual que su rango de valores, por lo menos hasta completar la $Llac$ (93 días y 3,029 cm/d en la Figura 57); para esta combinación de $Llac - Llev$, luego de completar la $Llac$ se tiene un período de no lluvia de 2 días y luego en el día 95 se presenta la $Llev$ de 0,01 cm/d en 8 horas. Los rangos de valores de cabezas de presión ψ en cualquier instante de tiempo se mantienen similares en 2-D y 3-D, mientras que la distribución de cabezas de presión ψ es similar cuando se presenta $Llac$ o $Llev$, pero cuando no hay lluvia la distribución en 2-D y 3-D cambia, como se aprecia en la Figura 58.

La modelación en 3-D de la Figura 58, en el período de no lluvia refleja una distribución de cabezas de presión ψ más horizontalizada que la distribución lograda en 2-D para las mismas condiciones, lo que muestra la influencia en la modelación 3-D que se considera más cercana a la realidad. Cuando se presenta la $Llev$ luego del período de no lluvia, en 2-D y 3-D las cabezas de presión ψ nuevamente se distribuyen en forma similar.

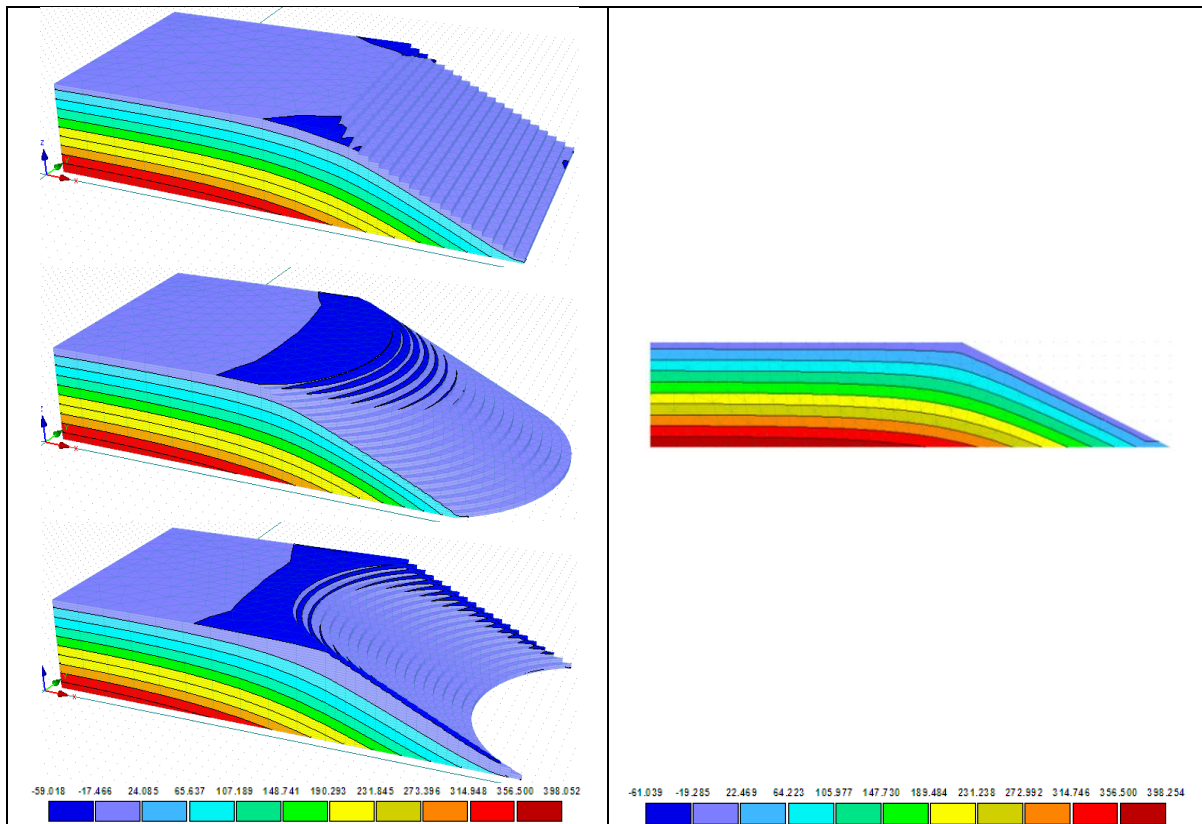


Figura 57. Comparación de ψ alcanzados para $Llac = 3,029$ cm/d. **(Izquierda)** 90 días 2-D + 3 días 3-D, Formas Básicas: No. 1, No. 4 y No. 7, según Parsons (1988) (Figura 53). **(Derecha)** 93 días 2-D, Forma en Perfil: Planar. Suelo de textura *Franco limoso*. Escalas para ψ en cm.

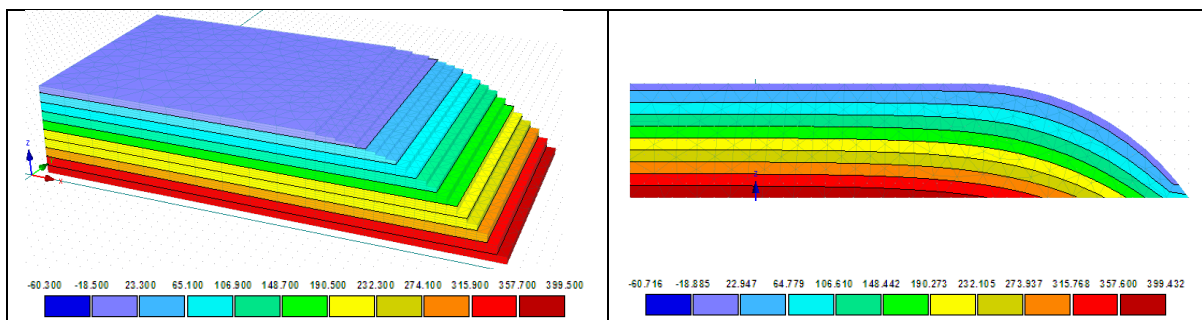


Figura 58. Comparación de ψ alcanzados en período de no lluvia, luego de $Llac = 3,029$ cm/d. **(Izquierda)** 3-D, 93 días $Llac$ + 1 día no lluvia, Forma Básica: No. 2, según Parsons (1988) (Figura 53). **(Derecha)** 2-D, 93 días $Llac$ + 1 día no lluvia, Forma en Perfil: Convexo. Suelo de textura *Franco limoso*. Escalas para ψ en cm.

De las modelaciones 3-D efectuadas para los umbrales resaltados en la Tabla 30, se ha observado lo siguiente:

- Se ha confirmado la influencia de la textura del suelo en la respuesta hídrica del mismo, puesto que suelos con texturas gruesas responden con mayor velocidad a los cambios en la infiltración, si se comparan con suelos de textura más fina o lo que es equivalente, con menor permeabilidad.
- Los rangos de valores en cabeza de presión ψ para modelaciones en 2-D y 3-D son muy similares, y su distribución también, excepto en los periodos de no lluvia; la modelación en 3-D se acerca más a lo real que la de 2-D, pero como es de suponerse en algunos casos se puede emplear la modelación en 2-D con resultados muy cercanos a la realidad.
- En los que tiene que ver con la modelación de las 9 Formas Básicas de Parsons (1988), en los taludes con poca profundidad o que puedan causar deslizamientos superficiales, ejerce mayor influencia la forma en perfil que la forma en planta, según se pudo apreciar en las 36 modelaciones 3-D realizadas.

4. INFLUENCIA DE LA RESPUESTA HÍDRICA EN LA ESTABILIDAD

Partiendo de las modelaciones de la respuesta hídrica en 2-D y 3-D del capítulo 3, con los umbrales de lluvia del evento (*Llev*) y la lluvia acumulada (*Llac*) reportadas por Mayorga (2003), se evaluará la influencia de la respuesta hídrica en la estabilidad de taludes.

Se trabajará con textura de suelo *Areno francoso*, *Franco limoso* y *Franco arcilloso* para efectuar las modelaciones de estabilidad de taludes. Estas texturas, adicionalmente a los parámetros hidráulicos consignados en la Tabla 22, se complementan con parámetros promedio de resistencia adoptados para cada textura de suelo, como se observa en la Tabla 31.

Tabla 31. Parámetros hidráulicos y de resistencia para modelar la estabilidad

No	Textura	Parám. hidráulicos Van Genuchten					Parám. resistencia		
		θ_r [cm ³ /cm ³]	θ_s [cm ³ /cm ³]	α [cm ⁻¹]	n	Ks [cm/día]	γ [kPa/m]	ϕ' [°]	c' [kPa]
1	Areno francoso	0,057	0,41	0,124	2,28	350,20	19,50	28,0	2,0
2	Franco limoso	0,067	0,45	0,020	1,41	10,80	19,00	25,0	10,0
3	Franco arcilloso	0,095	0,41	0,029	1,31	6,24	18,00	18,0	25,0

4.1 MODELACIÓN CON TALUD INFINITO

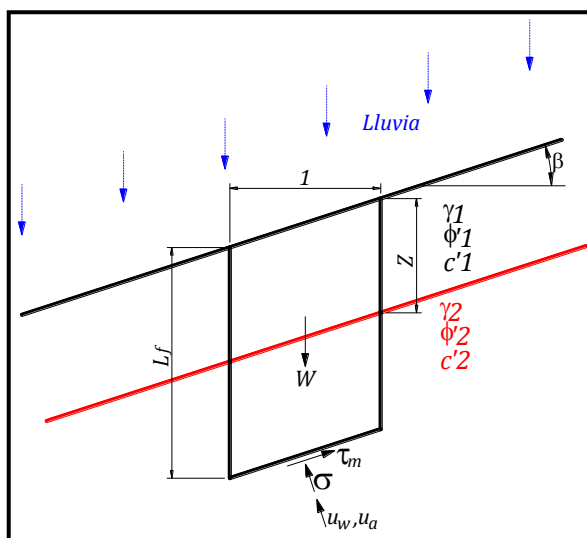


Figura 59. Falla en talud infinito para dos capas de suelo (Adaptado de Cho, 2009)

Las 10 modelaciones de respuesta hídrica del suelo usando los umbrales de lluvia evento – lluvia acumulada del numeral 3.2.3.2 serán empleadas para evaluar la estabilidad por medio del modelo de talud infinito. Adicional a las modelaciones con inclinación de 15° del numeral 3.2.3.2, se modeló la respuesta hídrica del suelo con las 5 combinaciones de texturas y 2 combinaciones de *Llev* – *Llac* para inclinaciones de 2.00:1 y 1.54:1 (H:V) ($\beta = 26.56^\circ$ y 33°), comprobando que se obtienen los mismos valores de θ y ψ para cada una de las 10 combinaciones del numeral 3.2.3.2.

En la Figura 59 se observa la representación gráfica de talud infinito para dos capas de suelo con texturas diferentes. Siguiendo el modelo planteado por Cho (2009) donde evalúa la estabilidad superficial de taludes formados por dos capas de suelo, involucrando el criterio de falla extendido de Mohr–Coulomb aportado por Fredlund et al. (1978) para suelos parcialmente saturados; se analizará la estabilidad para las 6 combinaciones de *Llev* – *Llac* del numeral 3.2.3.2. Tomando en consideración la Figura 59, se tiene que:

$$w = \gamma_1 z + \gamma_2 (L_f - z) \quad (61a) \quad \sigma = w \cos \beta \cos \beta \quad (61b) \quad \tau_m = w \sin \beta \cos \beta \quad (61c)$$

$$FS = \frac{\tau}{\tau_m} = \frac{c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b}{w \sin \beta \cos \beta}$$

$$= \frac{2c'}{[\gamma_1 z + \gamma_2 (L_f - z)] \sin 2\beta} + \left[\frac{\tan \phi'}{\tan \beta} - \frac{2u_a \tan \phi'}{[\gamma_1 z + \gamma_2 (L_f - z)] \sin 2\beta} \right] + \frac{2(u_a - u_w) \tan \phi^b}{[\gamma_1 z + \gamma_2 (L_f - z)] \sin 2\beta} \quad (62)$$

Para obtener ϕ^b se usará (55). *FS* = factor de seguridad que evalúa la estabilidad, τ = resistencia al corte, según Fredlund et al. (1978), τ_m = esfuerzo actuante de corte, β = ángulo del talud, w = peso unitario del elemento, c' , σ , u_a , u_w , ϕ' y ϕ^b definidos en el numeral 2.3.3.2. γ_1 y γ_2 = peso unitario de la primera y segunda capa de suelo, respectivamente, z = profundidad de la primera capa, L_f = profundidad del frente húmedo medido desde superficie (numeral 2.2.2.1 y 2.2.2.4), γ_w = peso unitario del agua y ψ = cabeza de presión.

Si se presenta la condición saturada ($\psi \geq 0$), la presión del agua en los poros u_w desplazará la presión de aire en los poros u_a , obteniéndose:

$$FS = \frac{\tau}{\tau_m} = \frac{c' + (\sigma - u_w) \tan \phi'}{w \sin \beta \cos \beta} \quad (63)$$

y la presión de poros a la profundidad L_f será: $u_w = \gamma_w L_f \cos^2 \beta$ (64).

Cho (2009) presenta las siguientes expresiones para evaluar el factor de seguridad (*FS*):

- Para flujo en condición parcialmente saturada ($\psi < 0$):

$$\text{Si } L_f \leq z \quad FS = \frac{c'_1 + (\gamma_1 L_f \cos^2 \beta) \tan \phi'_1 + \psi_1 \gamma_w \tan \phi_1^b}{\gamma_1 L_f \sin \beta \cos \beta} \quad (65)$$

$$\text{Si } L_f > z \quad FS = \frac{c'_2 + (\gamma_1 z + \gamma_2 (L_f - z)) \cos^2 \beta \tan \phi'_2 + \psi_2 \gamma_w \tan \phi'_2}{(\gamma_1 z + \gamma_2 (L_f - z)) \sin \beta \cos \beta} \quad (66)$$

- Para flujo paralelo al talud, condición saturada ($\psi \geq 0$):

$$\text{Si } L_f \leq z \quad FS = \frac{c'_1 + (\gamma_1 - \gamma_w) L_f \cos^2 \beta \tan \phi'_1}{\gamma_1 L_f \sin \beta \cos \beta} \quad (67)$$

$$\text{Si } L_f > z \quad FS = \frac{c'_2 + (\gamma_1 z + \gamma_2 (L_f - z) - \gamma_w L_f) \cos^2 \beta \tan \phi'_2}{(\gamma_1 z + \gamma_2 (L_f - z)) \sin \beta \cos \beta} \quad (68)$$

Se evaluarán diversos factores de seguridad (FS) con el modelo de talud infinito para las profundidades $z = 0,57 \text{ m} - 1,14 \text{ m} - 1,71 \text{ m} - 2,29 \text{ m} - 2,86 \text{ m}$ y $3,43 \text{ m}$, tal como se consigna en las Figuras 48, 49, 50, 51 y 52 del numeral 3.2.3.2. Los resultados obtenidos para la influencia de la respuesta hídrica en la estabilidad, siguiendo el modelo de talud infinito se presentan a continuación en las Figuras 60, 61, 62, 63 y 64.

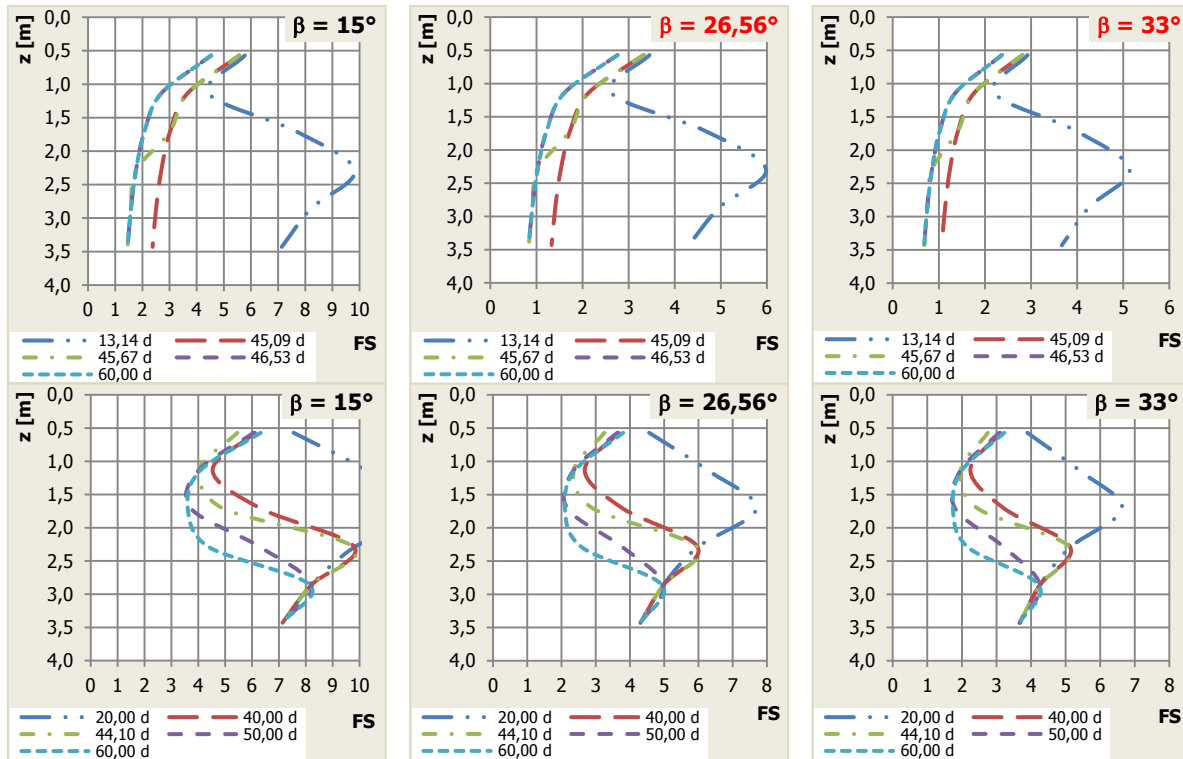


Figura 60. Variación de FS con la profundidad z para diferentes tiempos t , en un suelo de textura *Franco limoso (silty loam)*, evaluación con el modelo de talud infinito para 2 casos de $L_{lev} - L_{lac}$, con diferentes β . Corresponde con los valores de Ψ de la Figura 48.

(Superior) $L_{lac} = 2817 \text{ mm}$ (3,029 cm/día – 93 días), $L_{lev} = 0,8 \text{ mm}$ (0,01 cm/h – 8 horas),
(inferior) $L_{lac} = 370 \text{ mm}$ (0,925 cm/día – 40 días), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ (7,5 cm/h – 2 horas).

Luego de evaluar la influencia de la respuesta hídrica en la estabilidad para las 10 combinaciones de texturas y *Llev* - *Llac* modeladas en el numeral 3.2.3.2, con el modelo de talud infinito, se encuentra lo siguiente:

- En las Figuras 60 a 64 se observa una profundidad crítica para la cual el *FS* es menor si se compara con el resto del espesor de suelo, en especial para la combinación *I-D* que se encuentra en la fila 4 de la Tabla 30. En la Figura 60 es 1,5 m, en la Figura 61 es 3,0 m, en la Figura 62 está entre 1,0 a 1,6 m, en la Figura 63 es 1,6 m y en la Figura 64 está entre 2,3 a 3,5 m.
- En las Figuras 60, 61 y 62 se observa el cambio de estado parcialmente saturado a saturado totalmente y la influencia de la respuesta hídrica del suelo en la estabilidad del mismo, puesto que para el mismo instante de tiempo y a diferente profundidad se aprecia el salto y disminución en el *FS* cuando el suelo cuenta con incremento abrupto de presión de poros ψ .

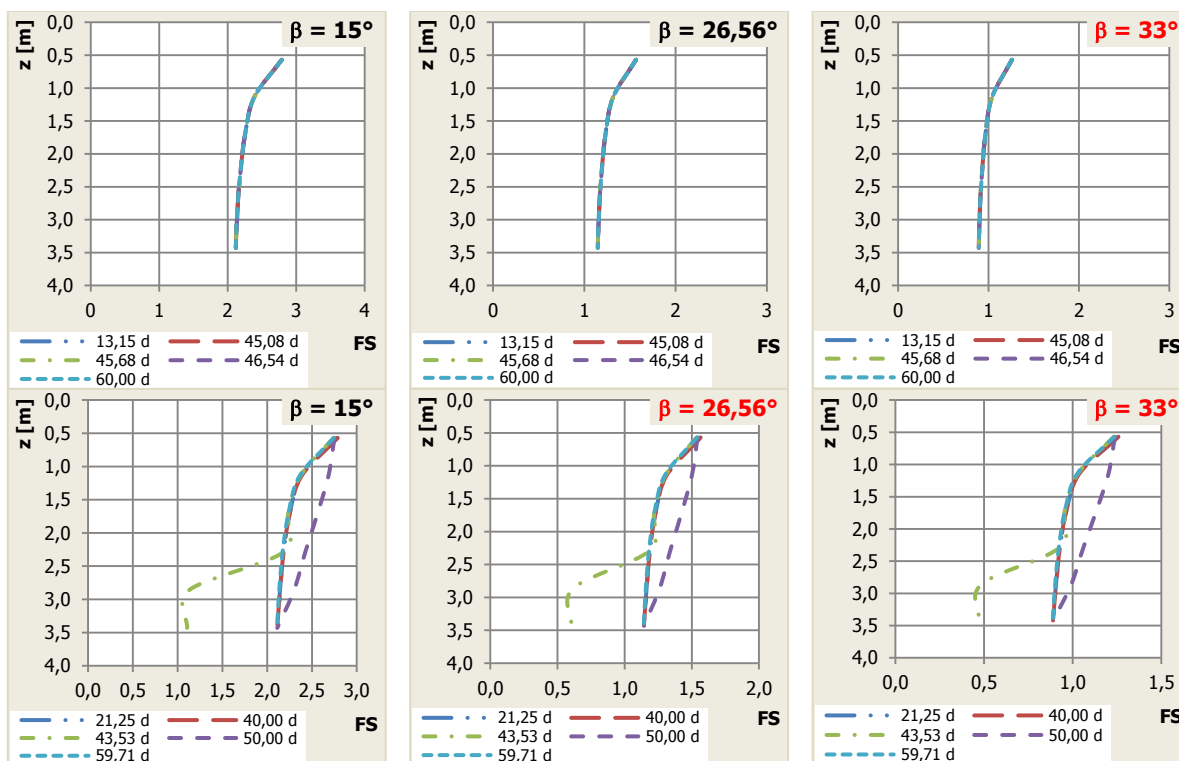


Figura 61. Variación de *FS* con la profundidad *z* para diferentes tiempos *t*, en un suelo de textura *Areno franco* (*loamy sand*), evaluación con el modelo de talud infinito para 2 casos de *Llev* - *Llac*, con diferentes β . Corresponde con los valores de Ψ de la Figura 49.

(Superior) *Llac* = 2817 mm (3,029 cm/día - 93 días), *Llev* = 0,8 mm (0,01 cm/h - 8 horas),
(inferior) *Llac* = 370 mm (0.925 cm/día - 40 días). *Llev* = 150 mm (7.5 cm/h - 2 horas).

- Ya que se han evaluado combinaciones de 2 texturas de suelo (Figuras 63 y 64), se puede apreciar la rápida reacción de las texturas más gruesas ante los cambios de presión de poros, sin importar su orden o posición respecto de texturas más finas, y así mismo la alta posibilidad de falla del talud que estaría implícita con el material de textura gruesa.
- En la Figura 61 se observa la influencia de la **Llev** fuerte, en la respuesta hídrica del suelo con textura gruesa y la poca influencia de la **Llev** leve en la respuesta hídrica para la misma textura, mientras que en la Figura 62 se refleja la notable influencia de grandes **Llac** en la respuesta hídrica en los suelos de textura fina y la poca influencia de pequeñas **Llac** en las mismas texturas de suelo.
- Adicional a la textura del suelo, la inclinación del talud influye activamente en el **FS** y obviamente en su falla; el mismo material con menor inclinación puede no fallar, pero aumentando su inclinación y manteniendo las mismas presiones de poros a tiempos iguales, el material se puede llevar a la falla. Cuando se aumenta la inclinación del material, el rango de **FS** disminuye si se comparan los mismos tiempos iniciales y finales.

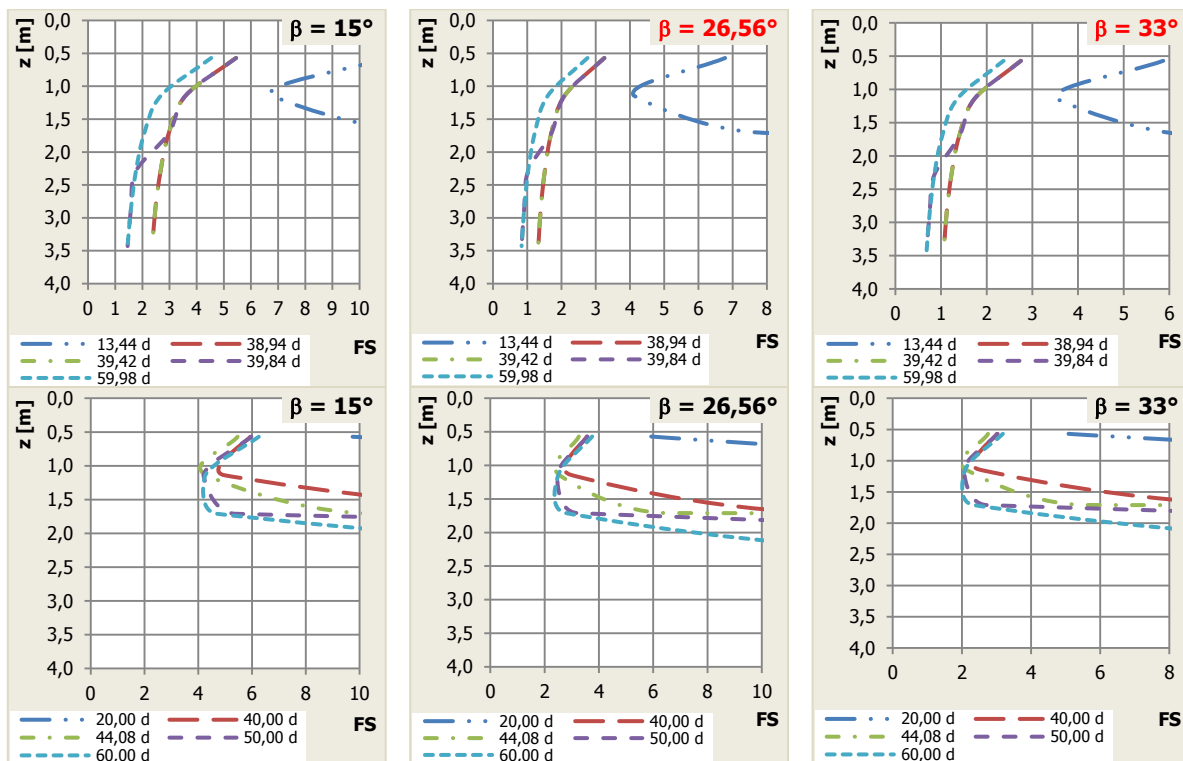


Figura 62. Variación de **FS** con la profundidad **z** para diferentes tiempos **t**, en un suelo de textura *Franco arcilloso* (*clay loam*), evaluación con el modelo de talud infinito para 2 casos de **Llev** - **Llac**, con diferentes β . Corresponde con los valores de Ψ de la Figura 50.

(Superior) **Llac** = 2817 mm (3,029 cm/día – 93 días), **Llev** = 0,8 mm (0,01 cm/h – 8 horas),
(inferior) **Llac** = 370 mm (0.925 cm/día – 40 días). **Llev** = 150 mm (7.5 cm/h – 2 horas).

- Con este ejercicio, al igual que otros realizados por diversos investigadores, se ha comprobado nuevamente que el nivel de saturación del suelo y su respectiva succión matricial determinan en gran medida la falla o no de un talud cuando se somete a factores como lluvia, cambio de inclinación, etc.
- Las dos combinaciones de umbrales de *Llev* - *Llac* evaluadas (grandes *Llac* con pequeños *Llev* y pequeños *Llac* con grandes *Llev*), han producido una importante respuesta hídrica del suelo que demuestra su efecto en la estabilidad de taludes y más concretamente para el caso de deslizamientos superficiales. Se evidencia el mayor efecto de altas *Llev* en texturas gruesas, puesto que se tienen incrementos bastante notorios de presión de poros durante el tiempo de simulación y claramente disminución del *FS*. Adicionalmente se ha comprobado que umbrales y relaciones de *Llev* - *Llac* también pueden producir deslizamientos superficiales, < 4,0 m.

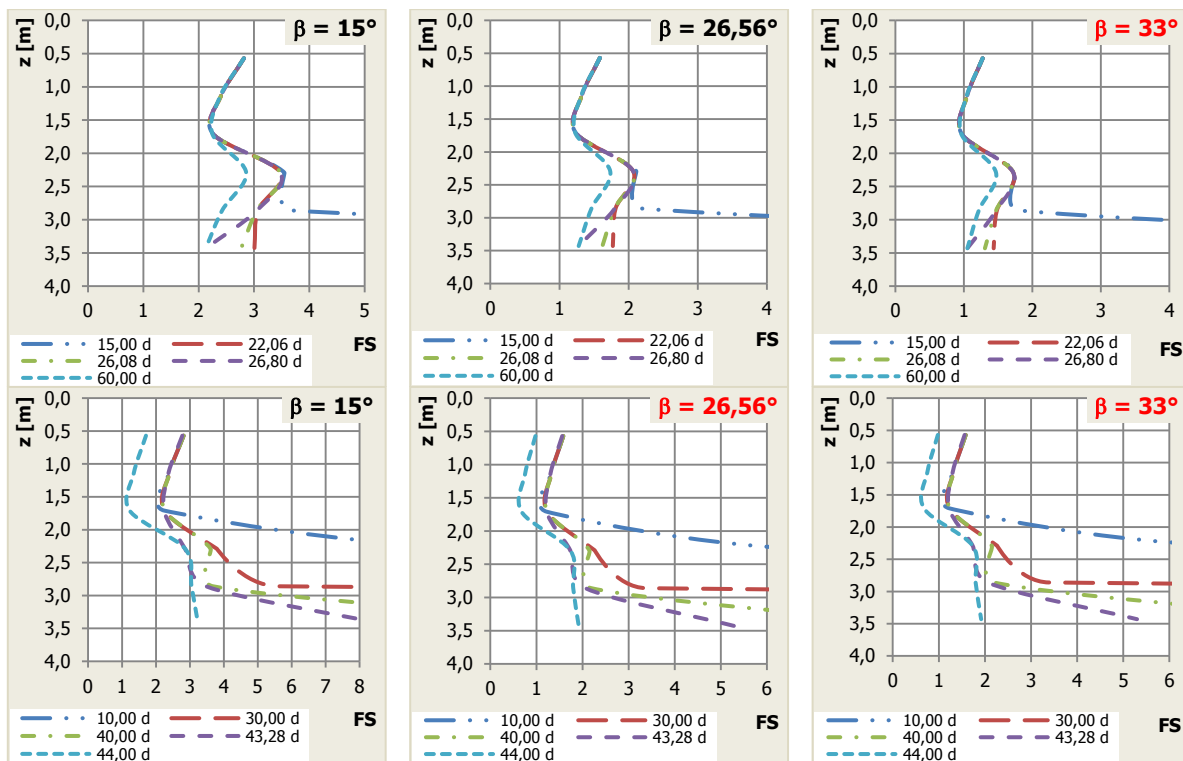


Figura 63. Variación de *FS* con la profundidad *z* para diferentes tiempos *t*, en dos suelos de textura *Arena francoso/Franco arcilloso* (*loamy sand/clay loam*), evaluación con el modelo de talud infinito para 2 casos de *Llev* - *Llac*, con diferentes β . Corresponde con los valores de Ψ de la Figura 51.

(Superior) *Llac* = 2817 mm (3,029 cm/día - 93 días), *Llev* = 0,8 mm (0,01 cm/h - 8 horas),
(inferior) *Llac* = 370 mm (0,925 cm/día - 40 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h - 2 horas).

- Con base en los resultados que se observan en las Figuras 60, 61, 62, 63 y 64, se puede inferir que definitivamente los suelos de textura gruesa, como las arenas, muestran que existe una relación directa de la respuesta hídrica frente a fuertes *Llev*, obviamente esto se refleja en la estabilidad del mismo, volviéndose inestables

con la lluvia evento; entre tanto, los suelos de textura fina no se muestran tan influenciados por las lluvias evento, pero la lluvia acumulada **Llac** si ejerce influencia en la respuesta hídrica del suelo, sobre todo si la **Llac** es grande, nuevamente reflejándose en la estabilidad del suelo con esta textura.

- La combinación de 2 texturas al igual que lo observado en el capítulo 3, muestra que los suelos con texturas más gruesas al responder más rápido frente a la infiltración, influyen el rápido cambio en la respuesta hídrica, lo que puede convertirlos en la capa más débil a la hora de evaluar estabilidad, si estos no presentan un nivel importante en la cementación de partículas. Adicionalmente, estos suelos al responder rápidamente ante la infiltración coinciden con el corto rango de la SWCC cuando se presentan incrementos en θ .
- Las expresiones y relaciones de lluvia reportadas por Castellanos y González (1997) y Mayorga (2003) aunque han sido desarrolladas con métodos estadísticos, en este estudio se ha evidenciado su útil empleo en la predicción de deslizamientos, debido a que permite aproximar su predicción, pero dependiendo de variables tales como inclinación del talud, textura del suelo, combinaciones de texturas, humedad inicial, etc.

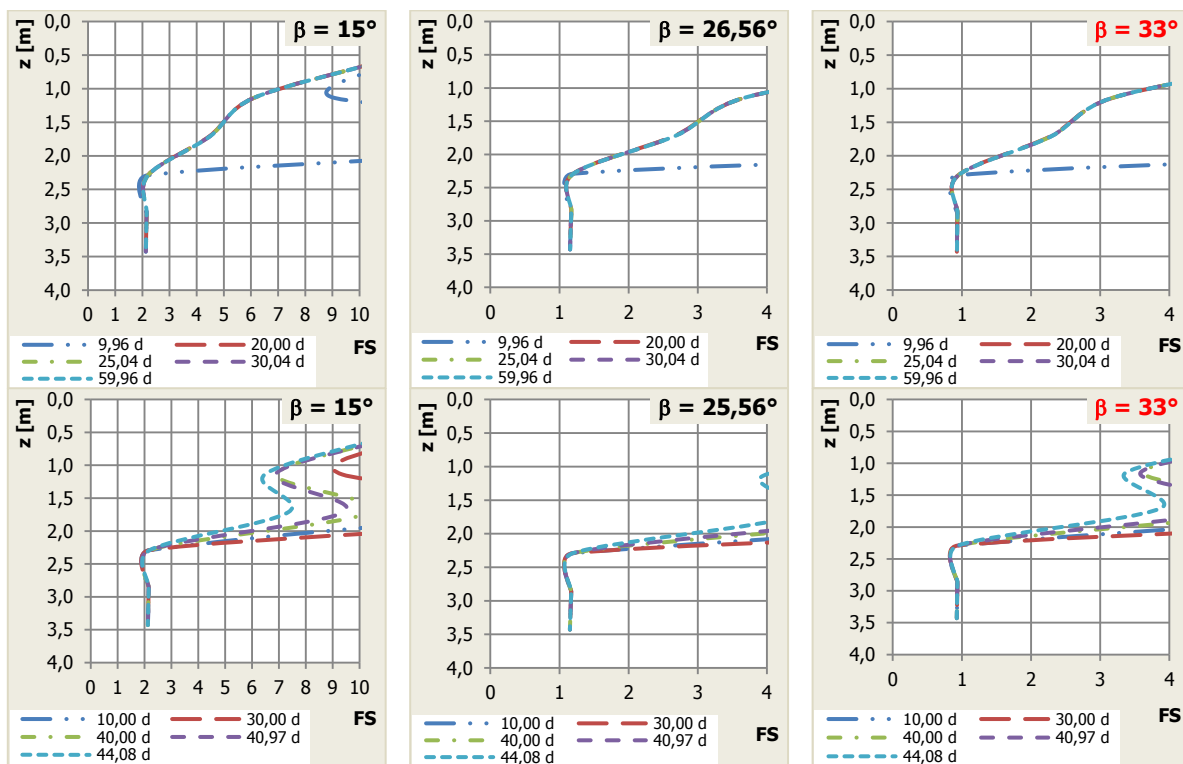


Figura 64. Variación de **FS** con la profundidad **z** para diferentes tiempos **t**, en dos suelos textura *Franco arcilloso/Areno francoso* (*clay loam/loamy sand*), evaluación con el modelo de talud infinito para 2 casos de **Llev - Llac**, con diferentes β . Corresponde con los valores de Ψ de la Figura 52.

(Superior) **Llac** = 2817 mm (3,029 cm/día – 93 días), **Llev** = 0,8 mm (0,01 cm/h – 8 horas),
(inferior) **Llac** = 370 mm (0,925 cm/día – 40 días), **Llev** = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas).

4.2 RESULTADOS DE LA INFILTRACIÓN MODELADA EN 3-D EVALUANDO EL FACTOR DE SEGURIDAD

Los resultados de las simulaciones de respuesta hídrica del suelo de los numerales 3.3.1 y 3.3.2 serán empleados para evaluar la estabilidad de los taludes, trabajando con el método de Bishop en el software Slide ® versión 5.014, desarrollado por Rocscience Inc. (2004), importando datos de cabezas de presión ψ generadas por medio de las modelaciones con Hydrus ®; en este caso ha sido posible importar presiones de poros ψ positivas y negativas, para las evaluaciones de estabilidad de taludes. En el caso de las modelaciones en 3-D se han importado datos de las secciones o planos transversales.

Como ya se mencionó en los numerales 3.3.1 y 3.3.2, sólo se ha tenido en cuenta una textura de suelo a la vez, para las simulaciones con Hydrus ®, y de igual forma para las modelaciones con Slide ®. Tomando en cuenta las condiciones de las modelaciones en 3-D descritas en los numerales 3.3.1 y 3.3.2, se realizaron 84 evaluaciones de estabilidad, para diferentes lapsos de tiempo y sus correspondientes cabezas de presión ψ (positivas y negativas), observando el cambio del Factor de Seguridad FS para esos tiempos, incluyendo los períodos de *Llac*, no lluvia y *Llev*.

Adicional a la modelación con Bishop, también se evaluó la estabilidad con los métodos de: Spencer, Morgensten – Price y Ordinario/Fellenius, lo que se puede ver en las Figuras 65 a 70, las cuales representan la evolución del FS en los períodos de *Llac*, no lluvia y *Llev*, como se observa en la Tabla 32.

Tabla 32. Duración de tiempo para las dos combinaciones de *Llev* - *Llac*

Combinación /localización según Tabla 30	Duración [días]			
	<i>Llac</i>	No lluvia	<i>Llev</i>	Total
1 / Qda La Chiva, N. de S.	93	2	0,333	24,67
4 / La Chapa, Boyacá	40	4	0,083	15,917
				60

En las Figuras 77 y 78, se observan las superficies de falla obtenidas luego de dos modelaciones realizadas con Slide ®, para las dos texturas trabajadas.

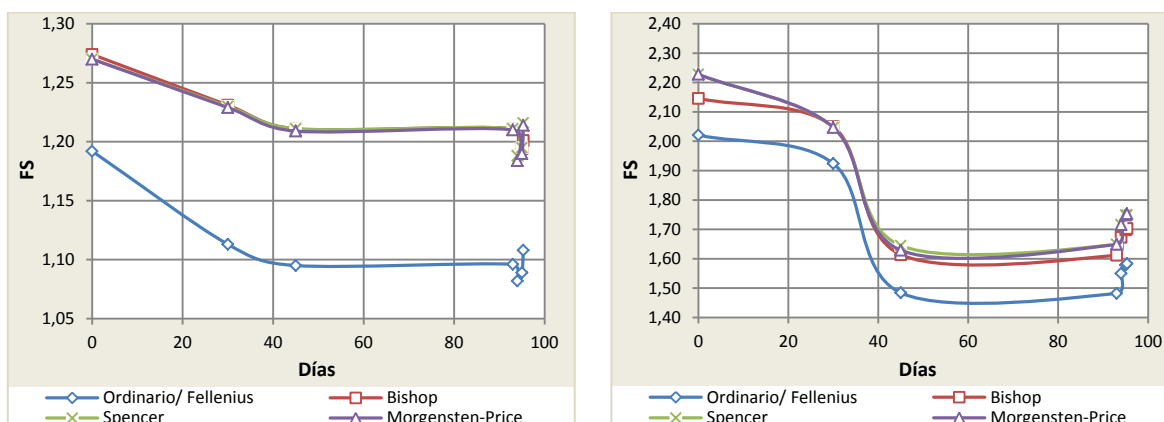


Figura 65. Variación de FS con el tiempo t : *Llac* = 2817 mm (3,029 cm/día – 93 días), *Llev* = 0,8 mm (0,01 cm/h – 8 horas). Forma del talud en perfil: **cóncavo**. (Izquierda) *Areno francoso*, (derecha) *Franco limoso*.

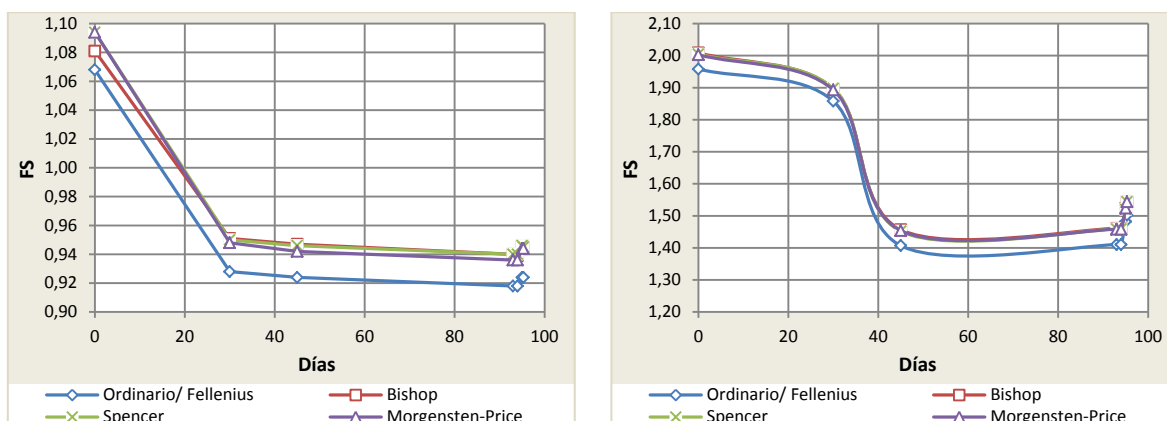


Figura 66. Variación de FS con el tiempo t : $Llac = 2817 \text{ mm}$ ($3,029 \text{ cm/día} - 93 \text{ días}$), $Llev = 0,8 \text{ mm}$ ($0,01 \text{ cm/h} - 8 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: **convexo**. (Izquierda) *Areno francoso*, (derecha) *Franco limoso*.

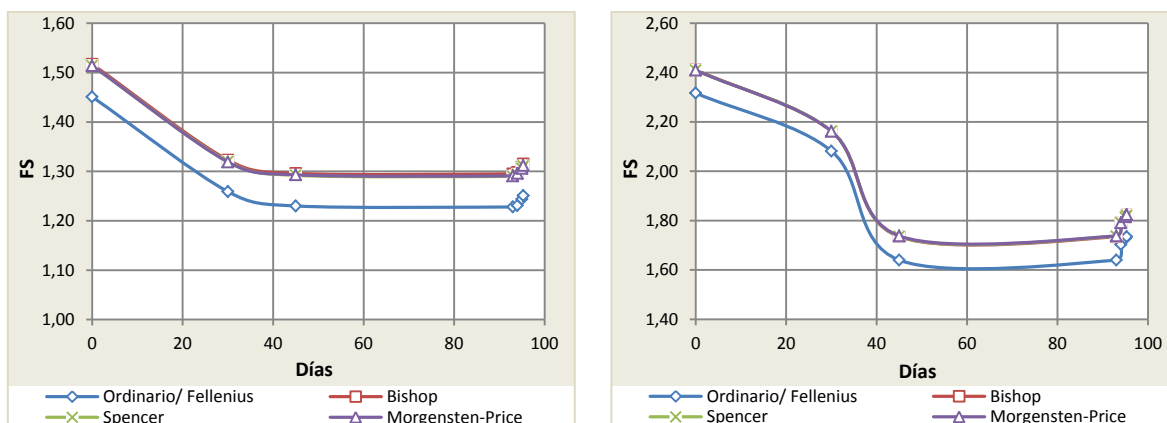


Figura 67. Variación de FS con el tiempo t : $Llac = 2817 \text{ mm}$ ($3,029 \text{ cm/día} - 93 \text{ días}$), $Llev = 0,8 \text{ mm}$ ($0,01 \text{ cm/h} - 8 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: **planar**. (Izquierda) *Areno francoso*, (derecha) *Franco limoso*.

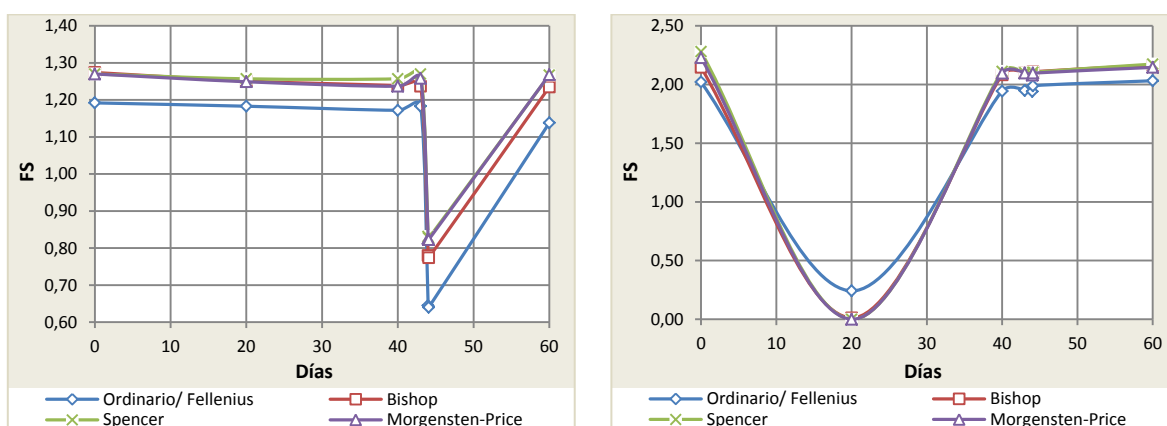


Figura 68. Variación de FS con el tiempo t : $Llac = 370 \text{ mm}$ ($0,925 \text{ cm/día} - 40 \text{ días}$), $Llev = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: **cóncavo**. (Izquierda) *Areno francoso*, (derecha) *Franco limoso*.

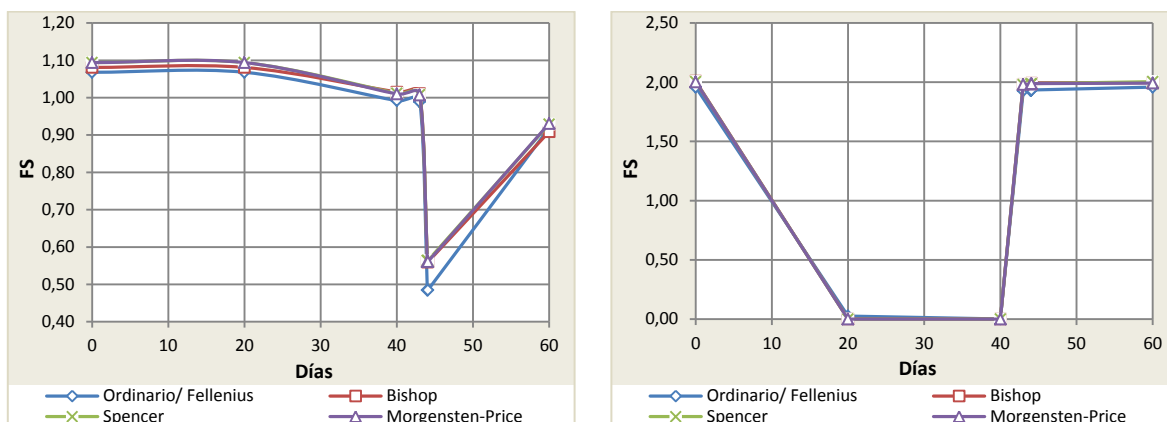


Figura 69. Variación de FS con el tiempo t : $Llac = 370 \text{ mm}$ ($0,925 \text{ cm/día} - 40 \text{ días}$), $Llev = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: **convexo**. (Izquierda) *Areno francoso*, (derecha) *Franco limoso*.

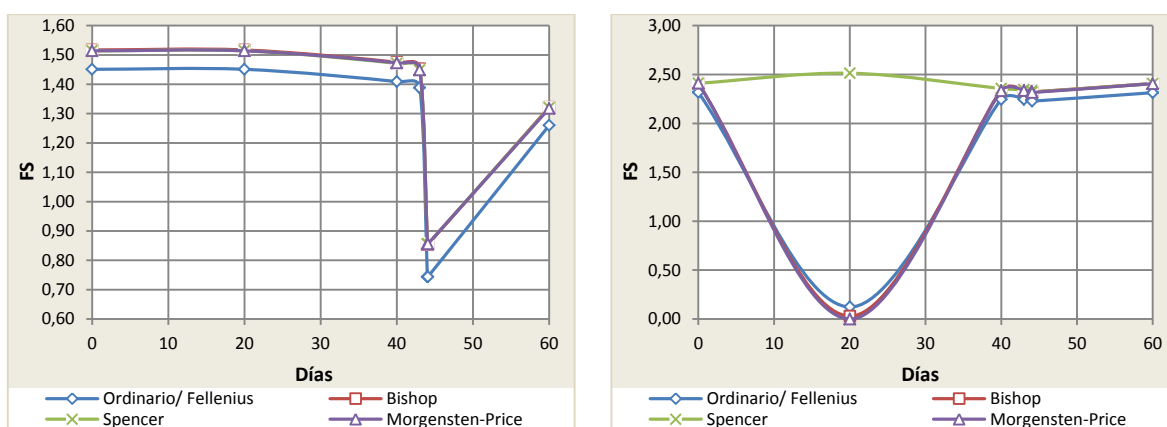
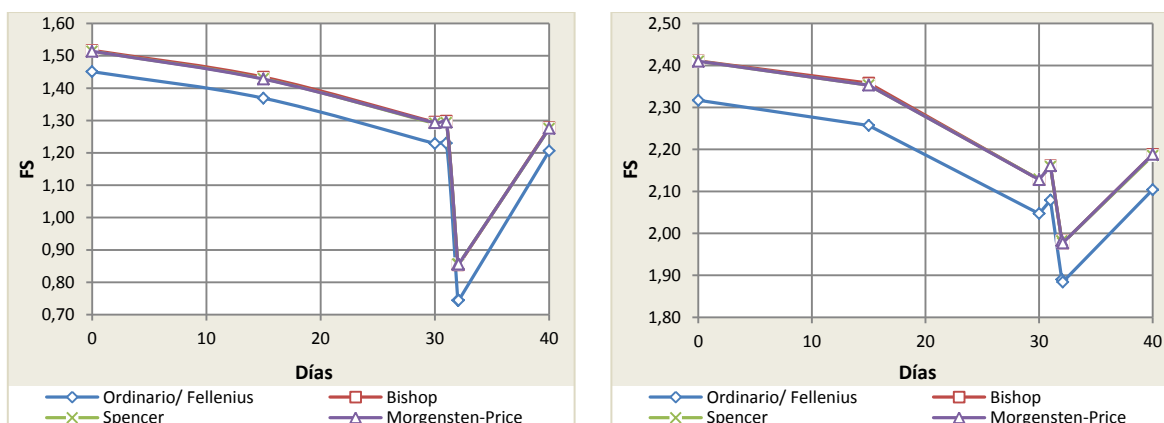
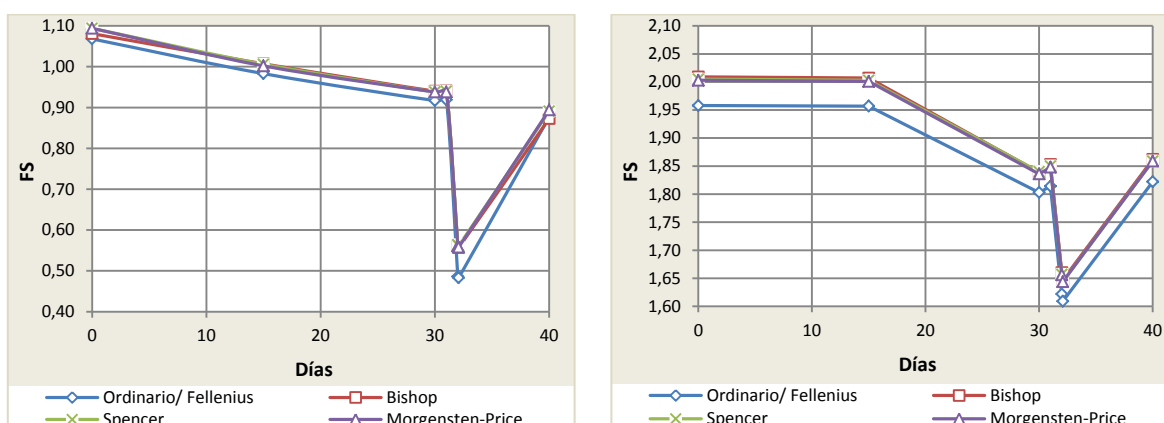
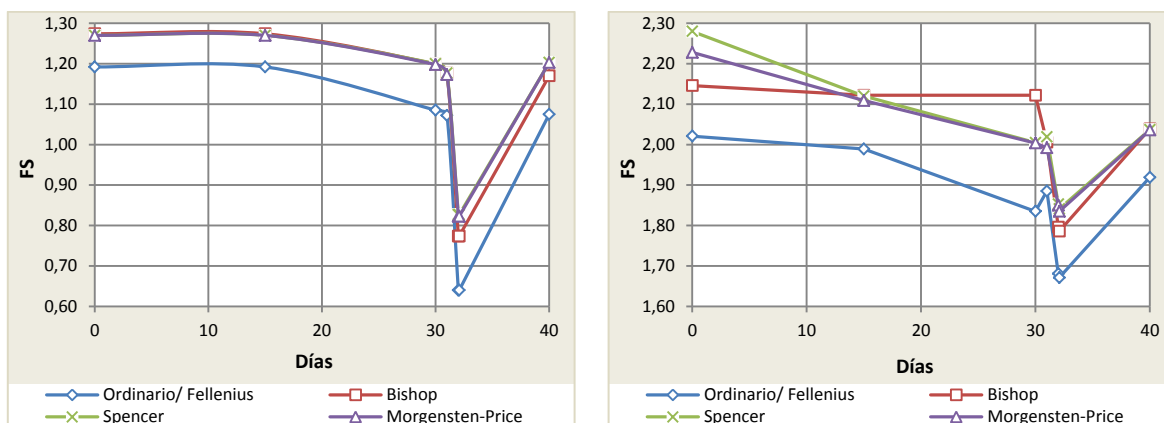


Figura 70. Variación de FS con el tiempo t : $Llac = 370 \text{ mm}$ ($0,925 \text{ cm/día} - 40 \text{ días}$), $Llev = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: **planar**. (Izquierda) *Areno francoso*, (derecha) *Franco limoso*.

Adicionalmente se han modelado otros dos valores de lluvia, siguiendo los mismos lineamientos para las modelaciones anteriores; en los dos casos se han tomado los tiempos mostrados en la Tabla 33.

Tabla 33. Duración de tiempo para otras dos combinaciones de $Llev - Llac$

$Llac$	Duración [días]			
	No lluvia	$Llev$	No lluvia	Total
30	2	0,083	7,917	40



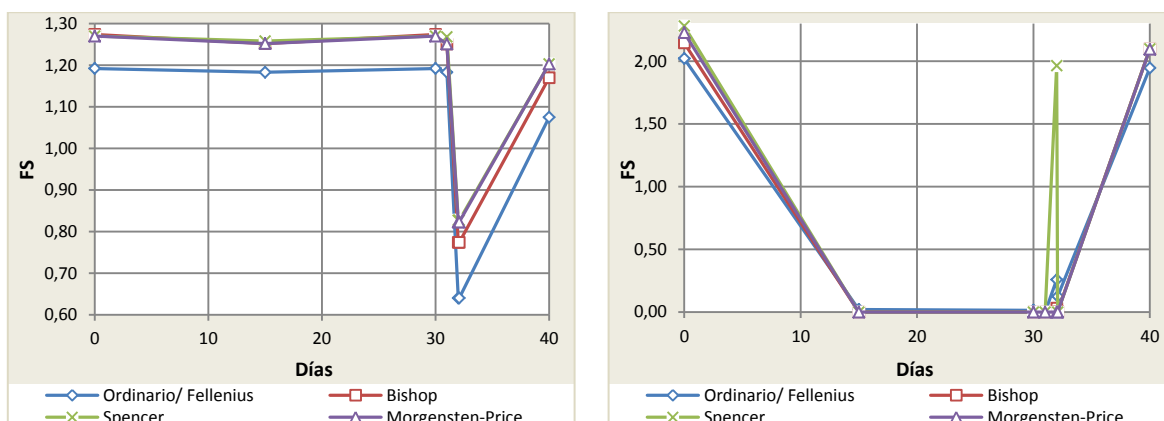


Figura 74. Variación de FS con el tiempo t : $L_{lac} = 100 \text{ mm}$ ($0,333 \text{ cm/día} - 30 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: **cóncavo**. (Izquierda) *Arena francoso*, (derecha) *Franco limoso*.

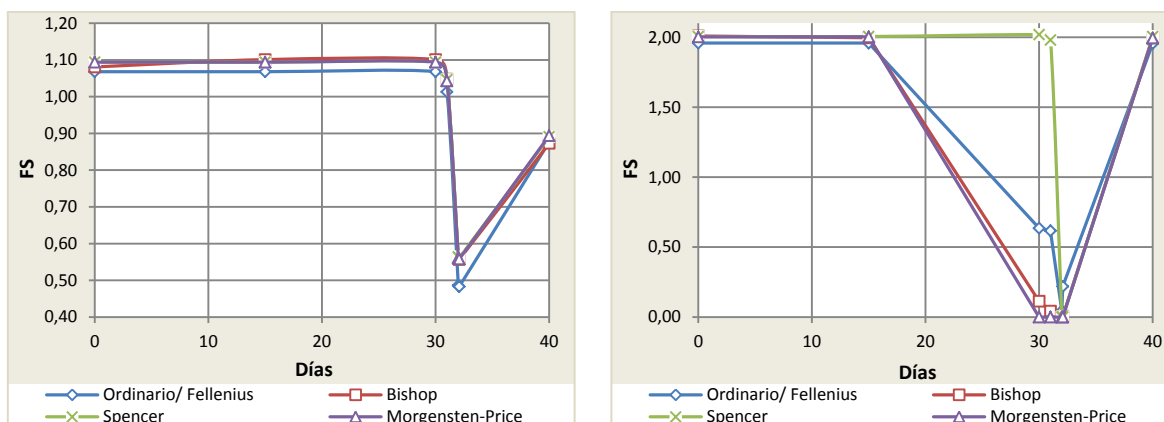


Figura 75. Variación de FS con el tiempo t : $L_{lac} = 100 \text{ mm}$ ($0,333 \text{ cm/día} - 30 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: **convexo**. (Izquierda) *Arena francoso*, (derecha) *Franco limoso*.

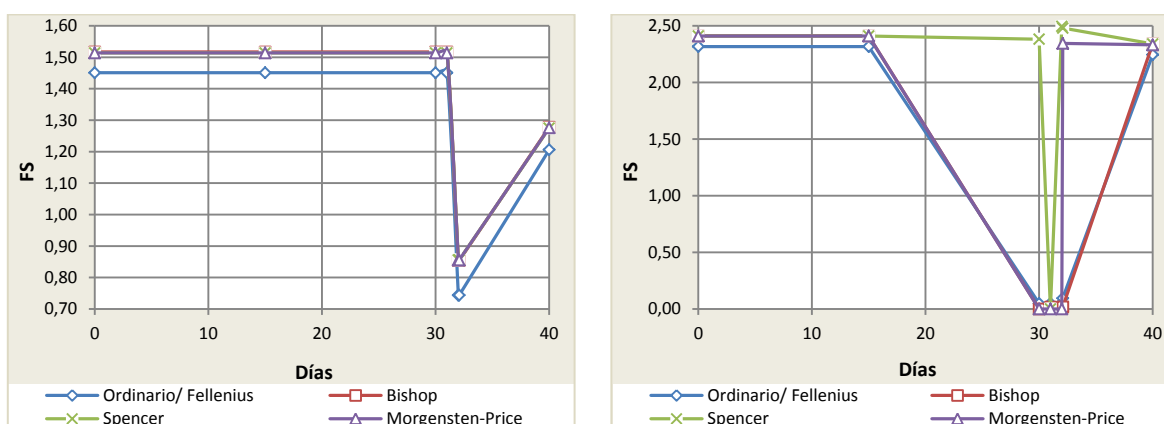


Figura 76. Variación de FS con el tiempo t : $L_{lac} = 100 \text{ mm}$ ($0,333 \text{ cm/día} - 30 \text{ días}$), $L_{lev} = 150 \text{ mm}$ ($7,5 \text{ cm/h} - 2 \text{ horas}$). Forma del talud en perfil: **planar**. (Izquierda) *Arena francoso*, (derecha) *Franco limoso*.

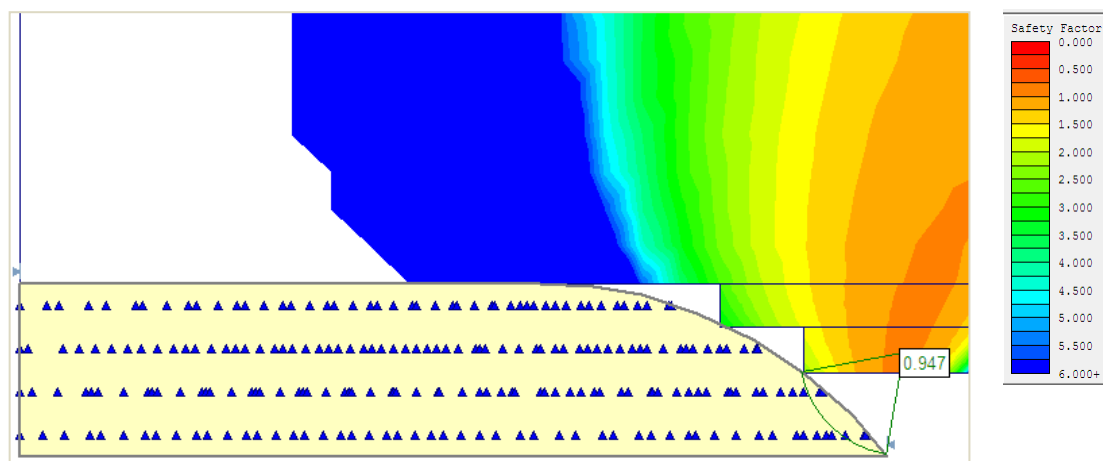


Figura 77. *FS* obtenido luego de 45 días de *Llac* (3,029 cm/día) en suelo de textura *Areno francoso*. Forma del talud en perfil: **convexo**.

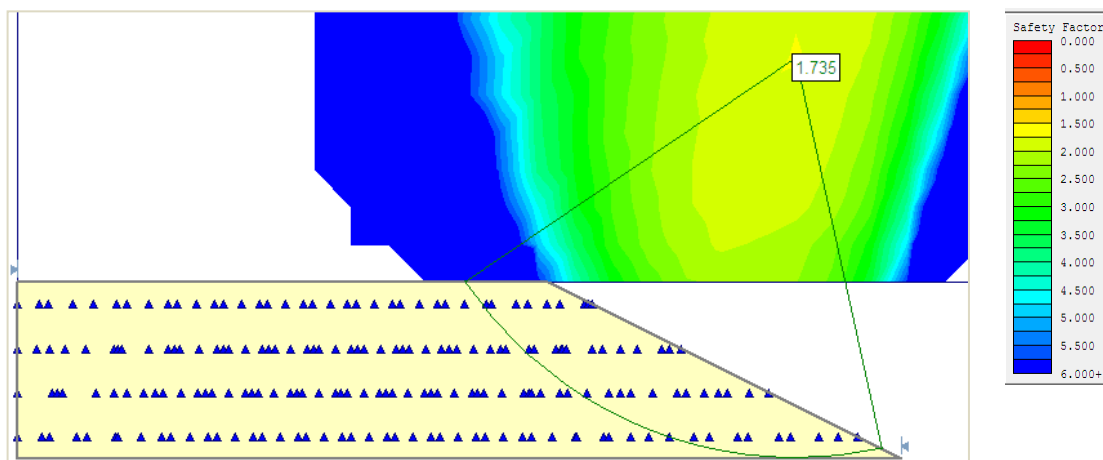


Figura 78. *FS* obtenido luego de 93 días de *Llac* (3,029 cm/día) en suelo de textura *Franco limoso*. Forma del talud en perfil: **planar**.

Luego de observar las Figuras 65 a 76, se concluye lo siguiente:

- Las tres formas en perfil, planar, convexo y cóncavo, presentan variaciones importantes en el *FS*, pero la que más frecuentemente muestra *FS* menores de 1,0 es el perfil convexo; las tres formas en perfil presentan falla superficial en suelo *Franco limoso*, suelo relativamente fino comparado con el suelo *Areno francoso*, como se muestra en el apéndice impreso al final del estudio.
- En el caso de la *Llac* de mayor duración (3,029 cm/día – 93 días), el suelo de textura más fina (*Franco limoso*) disminuye notablemente los valores de *FS* durante el periodo de *Llac*, mientras que el suelo de textura más gruesa (*Areno francoso*) presenta una fuerte disminución en los valores de *FS* desde el principio, en especial cuando se presenta la infiltración de la *Llev*.

- En el caso de la **Llac** de menor duración (0,925 cm/día – 40 días), el suelo de textura más fina (*Franco limoso*) falla durante el período de **Llac**, pero en forma superficial, como se observará en el Anexo impreso del presente trabajo; mientras que el suelo de textura más gruesa (*Areno francoso*), falla sólo cuando se aplica la **Llev**.
- De nuevo se confirma lo observado en las modelaciones anteriores, efectuadas por medio del modelo de Talud Infinito, debido a que se presenta la tendencia de falla en los suelos de textura más fina cuando se aplica **Llac** por largos periodos de tiempo, mientras que los suelos de textura más gruesa casi no presentan variación en sus **FS** bajo la aplicación de **Llac**, pero sí se observa una rápida disminución en su **FS** cuando se aplica un valor fuerte de **Llev**.
- Observando las Figuras 65 a 76 se confirma más que los suelos de textura gruesa como el *Areno francoso*, responden rápidamente con los fuertes aguaceros, mientras que los suelos con textura fina, no necesariamente responden frente a los aguaceros fuertes.
- Los suelos de textura fina tienen a producir deslizamientos muy superficiales cuando estos se saturan en la superficie, según se observa en el Apéndice impreso y las Figuras 65 a 76.

En el Apéndice impreso del presente trabajo se observan las superficies de falla y los valores de **FS** para las 84 evaluaciones de estabilidad.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Las ecuaciones de Richards y Green - Ampt son las que mejor modelan la infiltración en los suelos; en 1-D las dos ecuaciones ofrecen resultados muy aproximados a la realidad, aunque la ecuación de Green - Ampt resulta mucho más fácil de trabajar si se programa su algoritmo. Mientras que la ecuación de Richards resulta muy útil debido a que trabaja en 1-D, 2-D y 3-D, pero representa mayor tiempo en su programación.
- En las modelaciones realizadas con flujo constante de agua se observó que la cabeza de presión ψ se eleva a su máximo sólo cuando la infiltración llega a la parte inferior del suelo y encuentra una barrera impermeable y se completa la columna de agua que tiene su apoyo en el material impermeable. El suelo se satura pero no incrementa su cabeza de presión ψ de forma inmediata, puesto que transcurre un tiempo en el cual probablemente se expulsa el aire remanente dentro del suelo. Según las modelaciones realizadas para estas condiciones, primero se satura el suelo y luego se establece una entrada y salida de agua del volumen de control.
- A partir de las modelaciones se observa que las formas cóncavas y convexas de la base, influyen en la acumulación de agua dentro del suelo y desde luego en la distribución de cabezas de presión, sin importar la pendiente promedio general de la base. La textura del suelo también influye en la distribución de las cabezas de presión, puesto que los materiales con textura gruesa sólo acumulan saturación en las depresiones y desde luego presentan variación de cabezas de presión ψ en estas depresiones, mientras que los suelos con textura fina acumulan agua distribuida en todo del espesor y también las cabezas de presión ψ en la misma forma. Cuando intervienen varias texturas de suelo, se observa que los de textura fina retienen agua por mayor tiempo que los de textura gruesa, pero estos últimos reaccionan más rápido frente a los cambios de cabezas de presión ψ , además los suelos de textura gruesa presentan rangos menos amplios en la variación de cabezas de presión ψ negativos (succión) que los de textura fina; la combinación de menor rango en ψ negativos y menor tiempo de reacción de los suelos de textura gruesa hacen de estos los más susceptibles a la falla por eventos de lluvia de intensa pero corta duración, mientras que los suelos finos son más susceptibles a los eventos de infiltración larga pero de poca intensidad.
- Efectivamente los umbrales de lluvia de Guzzetti (2005) y Mayorga (2003) estudiados en este trabajo son válidos y pueden ser usados para predecir

deslizamientos y sus consecuencias, pero también deben complementarse con información geomorfológica, tipo de suelo y la estratificación presente en el sitio de interés, puesto que estos elementos influyen activamente para la ocurrencia o no en los deslizamientos.

- La textura de los suelos influye para que ocurran deslizamientos, debido a su capacidad de almacenar o no lluvia acumulada y de responder rápidamente o no ante lluvias intensas de corta duración; los suelos con textura fina almacenan infiltración proveniente de lluvia con intensidades moderadas aumentando lentamente su cabeza de presión ψ , mientras que los suelos de textura gruesa no almacenan tanta lluvia sino que responden rápidamente ante lluvias intensas, es decir aumentan rápidamente su cabeza de presión ψ y así mismo disminuyen su resistencia.
- La forma en perfil de los taludes también influye en el aumento o disminución del Factor de Seguridad; las formas convexa y cóncava en su orden, son las más propensas de presentar falla, mientras que la forma planar presenta mayor estabilidad. La distribución de cabezas de presión ψ dentro de la masa de suelo tiende a acumularse según la forma del perfil en los sitios de mayores protuberancias o resaltos.
- Las modelaciones de infiltración en 2-D y 3-D mantienen similitud en la distribución y en los rangos de cabezas de presión ψ , cuando el material se encuentra en proceso activo de infiltración; cuando cesa la infiltración, el rango de cabezas de presión ψ se mantiene pero la distribución se observa de forma diferente, puesto que en 2-D no presenta variación respecto del proceso de infiltración, mientras que en 3-D se observa que la cabeza de presión ψ se distribuye equitativamente con la profundidad sin importar la forma del talud. Esto se debe a la redistribución de presiones de poros que si se tiene en cuenta en la modelación en 3-D.
- Las condiciones de frontera son determinantes para las modelaciones, puesto que pueden incidir en sus resultados. Las condiciones de frontera se deben elegir de tal forma que estas representen de forma muy cercana la realidad del terreno.
- Se observa una variación importante en el Factor de Seguridad cuando se realiza el análisis de estabilidad en condiciones saturadas y en condiciones parcialmente saturadas, debido a que la succión juega un papel importante en el cálculo de los esfuerzos resistentes en el material analizado. Así mismo, el suelo reacciona más rápidamente cuando se tienen mayores inclinaciones del talud, disminuyendo rápidamente el Factor de Seguridad de los suelos.
- La falla en los suelos de textura fina ocurre más pronto en la superficie cuando se tienen intensidades bajas de lluvia, ya que se produce una infiltración casi total de la lluvia y se presenta el aumento inmediato en la cabeza de presión ψ a muy poca profundidad y con esto se ocasiona la falla superficial. En tanto, los suelos con

texturas más gruesas presentan superficies de falla más profundas y reaccionan rápidamente a las lluvias torrenciales.

- En los suelos de textura gruesa (valores altos de K_s) es notable la influencia de la forma en perfil para los Factores de Seguridad alcanzados, puesto que en las mismas condiciones y con la misma forma, materiales granulares tienen Factores de Seguridad más altos. La forma convexa, que es la más desfavorable, en suelos granulares tiende a ubicar la superficie de falla en la zona donde se acumula la saturación.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar ejercicios de infiltración en campo, para estudiar más profundamente la infiltración y medir directamente velocidades, infiltración acumulada, humedades y cabezas de presión.
- Se recomienda realizar modelaciones con condiciones de frontera diferentes a las realizadas en este estudio, con el objeto de contrastar resultados y verificar la influencia de las condiciones de frontera sobre las simulaciones realizadas.
- Se sugiere estudiar y/o desarrollar ecuaciones que acoplen directamente la respuesta hídrica del suelo con la estabilidad del mismo. Este sería un avance interesante que mientras más fielmente represente el terreno, contribuirá de mejor forma a la predicción de deslizamientos.
- Se sugiere que en los estudios de estabilidad de taludes no solo se incluyan parámetros de resistencia del suelo, sino que también se incluyan parámetros hídricos que como se ha visto, muestran su influencia en la estabilidad de taludes.
- Se sugiere incluir umbrales de lluvia dentro de los modelos de estabilidad de taludes, puesto que se ha demostrado que son una buena referencia a la hora de comenzar estos estudios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDRABBO, F.M., ABDELAZIZ, T.M. Study of the infiltration of water through collapsible soil. En: Unsaturated soils. (2006); p. 1049-1060.

ALVAREZ MANILLA, A.A., BARRERA BUCIO, M., FLORES FLORES, M., GARNICA ANGUAS, P., y otros, Mecánica de suelos no saturados. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos A.C. 2004. 322 p.

ANDERSON, S.A., SITAR, N. Analysis of rainfall-induced debris flows. En: Journal of Geotechnical Engineering. Vol.; 121. No. 7 (Julio 1995); p. 544-552.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Hydrology Handbook. Second Edition. Washington. ASCE, 1994.

CASTELLANOS, R., GONZÁLEZ, A. Algunas relaciones de precipitación crítica-duración de lluvias que disparan movimientos en masa en Colombia. 2nd Panamerican Symposium on Landslides – ABMS, Vol.; 2 (1997); p. 863-877.

CHEENGANG, B., BIWEI, G., ZHAN, L. Properties of unsaturated soils and slope stability of expansive soils. En: Second international conference on unsaturated soils. Vol.; II. (Agosto 1998); p. 71-98.

CHEN, L., YOUNG, M.H. Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces. En: Water Resources Research. Vol.; 5. No. 1 (Febrero 1969); p. 153-171.

CHO, S.E. Infiltration analysis to evaluate the surficial stability of two-layered slopes considering rainfall characteristics. En: Engineering Geology. No. 105 (enero 2009); p. 32-43.

CHO, S.E., LEE, S.R. Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics. En: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol.; 42. (2006); p. 1-9.

CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R., MAYS, L.W. Hidrología Aplicada. Bogotá: McGRAW-HILL, 1994. 584 p.

COLLINS, B.D., ZNIDARCIC, D. Stability analyses of rainfall induced landslides. En: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol.; 130. No. 4 (Abril 2004); p. 362-372.

FREDLUND, D.G., XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. En: Canadian of Geotechnical Journal. No. 31 (marzo 1994); p. 521-532.

FREDLUND, D.G., RAHARDJO, H. Soil Mechanics for unsaturated soils. New York: Wiley Interscience, 1993. 517 p.

FREDLUND, D.G. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. En: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol.; 132. No. 3 (Marzo 2006); p. 286-321.

FREDLUND, D.G., VANAPALLI, S.K. Shear strength of unsaturated soils. En: Agronomy Soil Testing Manual. Agronomy Society of America. (2002); p. 329-661 (1-33).

FREEZE, R.A. The mechanism of natural ground-water recharge and discharge 1. One-dimensional, vertical, unsteady, unsaturated flow above a recharging or discharging ground-water flow system. En: Water Resources Research. Vol.; 5. No. 1 (Febrero 1969); p. 153-171.

GASMO, J.M., RAHARDJO, H., LEONG, E.C. Infiltration effects on stability of a residual soil slope. En: Computers and Geotechnics. No. 26 (2000); p. 145-165.

GARVEN, E.A., VANAPALLI, S.K. Evaluation of empirical procedures for predicting the shear strength of unsaturated soils. En: Unsaturated soils. (2006); p. 2570-2581.

GERSCOVICH, D.M.S., VARGAS, E.A., de CAMPOS, T.M.P. On the evaluation of unsaturated flow in a natural slope in Rio de Janeiro, Brazil. En: Engineering Geology. No. 88 (Julio 2006); p. 23-40.

GUZZETTI, F., PERUCCACCI, S., ROSSI, M. RISK AWARE. RISK – Advanced weather forecast system to advice on risk events and management. Definition of critical threshold for different scenarios. Action 1.16. IRPI CNR, Perugia, Italia. 2005.

GUZZETTI, F., PERUCCACCI, S., ROSSI, M., STARK, C.P. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. En: Meteorology and Atmospheric Physics. (Junio 2007).

HAAN, C.T., BARFIELD, B.J., HAYES, J.C. Desing hydrology and sedimentology for small catchments. San Diego: Academic Press, 1994. 583 p.

IVERSON, R.M. Landslide triggering by rain infiltration. En: Water Resources Research. Vol.; 36. No. 7 (Julio 2000); p. 1897-1910.

JIANG, J.C., YAMAGAMI, T., UENO, K. Three-dimensional back analysis of unsaturated soil strength parameters. En: Unsaturated soils. (2000); p. 789-794.

KIM, J., JEONG, S., PARK, S., SHARMA, J. Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. En: Engineering Geology. No. 75 (Agosto 2004); p. 251-262.

LADE, Poul V. The mechanics of surficial failure in soil slopes. En: Engineering Geology. No. 114 (2010); p. 57-64.

LEE, L.M., GOFAR, N., RAHARDJO, H. A simple model for preliminary evaluation of rainfall-induced slope instability. En: Engineering Geology. No. 108 (Julio 2009); p. 272-285.

LU, Ning. Is matric suction a stress variable? En: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol.; 134. No. 7 (Julio 2008); p. 899-905.

LU, Ning, LIKOS, William J., Unsaturated soil mechanics. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. 556 p.

MAYORGA M., R. DETERMINACIÓN DE UMBRALES DE LLUVIA DETONANTE DE DESLIZAMIENTOS EN COLOMBIA. Bogotá D.C., 2003., 223 p. Tesis (Maestría en Ciencias - Meteorología) Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Facultad de Ciencias. Departamento de Geociencias.

MARTINEZ DE AZAGRA, A., PANDO, V., DEL RÍO, J., NAVARRO, J. Aproximación al conocimiento de la infiltración a través del análisis dimensional. En: Ecología. No. 20 (2006); p. 471-492.

MIAO, L., LUI, S., LAI, Y. Research of soil-water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil. En: Engineering Geology. No. 65 (2002); p. 261-267.

MITCHELL, R.J. Appendix A. Hydrologic Soil Groups. {En línea}. {julio 11 de 2011}. Disponible en: (http://geology.wvu.edu/rjmitch/hydro_soil_groups.pdf).

NG, C.W.W., SHI, Q. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage. En: Computers and Geotechnics. No. 22 (1998); p. 1-28.

PARSONS, A.J. Hillslope form. New York: Routledge, 1988. 213 p.

PRADEL, D., RAAD, G. Effect of permeability of surficial stability of homogeneous slopes. En: Journal of Geotechnical Engineering. Vol.; 119. No. 2 (Febrero 1993); p. 315-332.

QI, Zhiming. "Comparison of Finite Difference Method, Philip's Method and Green-Ampt Model in Infiltration Simulation". {En línea}. {julio 30 de 2011}. Disponible en: (www.public.iastate.edu).

RASAM, D.W., COOK, F. Predicting the shear strength envelope of unsaturated soils. En: Geotechnical Test Journal. Vol.; 2. No. 25 (2002); p. 215-220.

RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L., MILLER, N. Green-Ampt infiltration parameters from soils data. En: Journal of Hydraulic Engineering. Vol.; 109. No. 1 (Enero 1983); p. 62-70.

RODRIGUEZ PINEDA, C.E., First order identification of global slide and avalanche hotspots. Appendix A. Models for Earthquake- and Rain-Induced Landslides. En: Global Landslides and Avalanche Hotspots. NGI. Report No. 20021613-1 (diciembre de 2003); p. A1-A58.

SASAHARA, K. Mechanical model of shear deformation of a steep Sandy slope due to rainfall. En: Landslides in research, theory and practice. (2000); p. 1415-1320.

SCHAAP, Marcel G. "Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions". {En línea}. {julio 30 de 2011}. Disponible en: (<http://www.cals.arizona.edu/research/rosetta/download/rosetta.pdf>).

SHIMADA, K., FUJII, H., NISHIMURA, S. Stability analysis of unsaturated slopes considering changes of matric suction. En: Unsaturated soils. (1995); p. 293-298.

ŠIMŮNEK, J., VAN GENUCHTEN, M.TH., ŠEJNA, M. The Hydrus software package for simulating the two and three dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media: Technical manual. Version 1.0. Praga: PC-Progress, 2006. 213 p.

ŠIMŮNEK, J., VAN GENUCHTEN, M.TH., ŠEJNA, M. Software package for simulating the two and three dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media: User manual. Version 1.02. Praga: PC-Progress, 2007. 203 p.

SODDU, S., DELITALA, D., SCIABICA, M., BARROCO, G. Modelling groundwater effects on slope stability. En: Materials and Geoenvironment. Vol.; 50. No. 1 (2003); p. 349-352.

TEKINSOY, M.A., KAYADELEN, C., KESKIN, M.S., SÖYLEMEZ, M. An equation for predicting shear strength envelope with respect to matric suction. En: Computers and Geotechnics. No. 31 (2004); p. 589-593.

TURNER, Ellen R. COMPARISON OF INFILTRATION EQUATIONS AND THEIR FIELD VALIDATION WITH RAINFALL SIMULATION. Maryland, 2006, 185 p. Thesis (Master of Science). University of Maryland. Department of Biological Resources Engineering.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Natural Resources Conservation Service. National Engineering Handbook. Chapter 7: Hydrologic Soil Groups. Washington. NEH, 2007.

VALVERDE NIÑO, J. S. INESTABILIDAD DE TALUDES POR DESLAVE. Bogotá D.C., 2008, 307 p. Tesis (Maestría en Ingeniería - Geotecnia). Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola.

VAN GENUCHTEN, M.TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. En: Soil Science Society of America Journal. Vol.; 44. No. 5 (Septiembre – Octubre 1980); p. 891-898.

VÁSQUEZ VARELA, L. R. MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA RESPUESTA HÍDRICA DE TALUDES. Bogotá D.C., 2008, 117 p. Tesis (Maestría en Ingeniería - Geotecnia). Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola.

ZHAN, T.L., ZHANG, W.J., CHEN, Y.M. Influence of reservoir level change on slope stability of a silty soil bank. En: Unsaturated Soils. (2006); p. 463-472.

ZIMMERMANN, E.D., BASILE, P.A. Uso de funciones de pedotransferencia para la estimación de parámetros hidráulicos en suelos limosos (Llanura Argentina). En: Boletín Geológico y Minero. Vol.; 119 (1) (agosto 2008); p. 71-80.

APÉNDICE
EVOLUCIÓN DE LAS SUPERFICIES DE FALLA Y FS

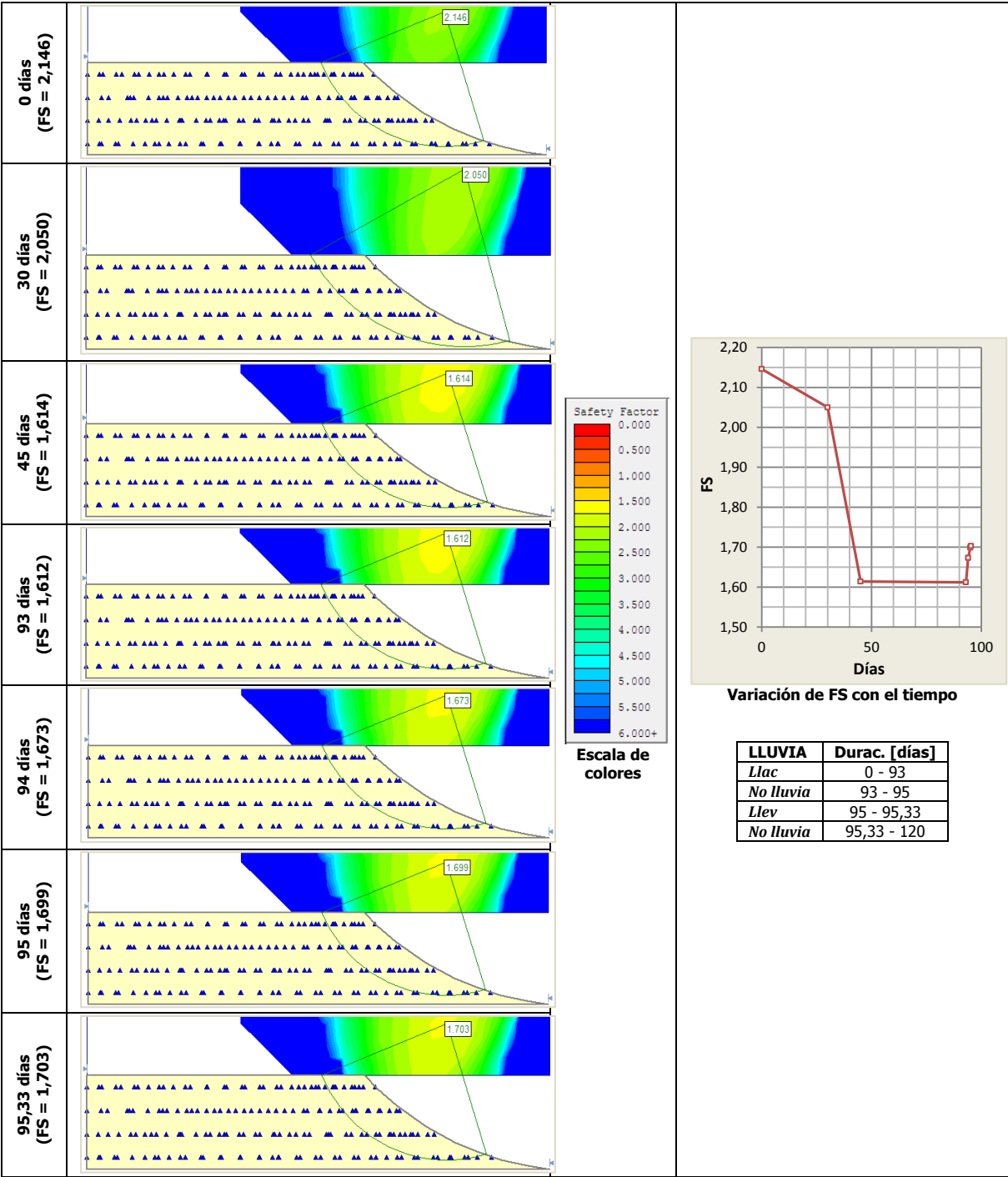


Figura A 1. Variación del FS con el tiempo: *Llac* = 2817 mm (3,029 cm/día – 93 días), *Llev* = 0,8 mm (0,01 cm/h – 8 horas). Forma del talud en perfil: **cóncavo**. Textura: **Franco limoso**. Método de Bishop.

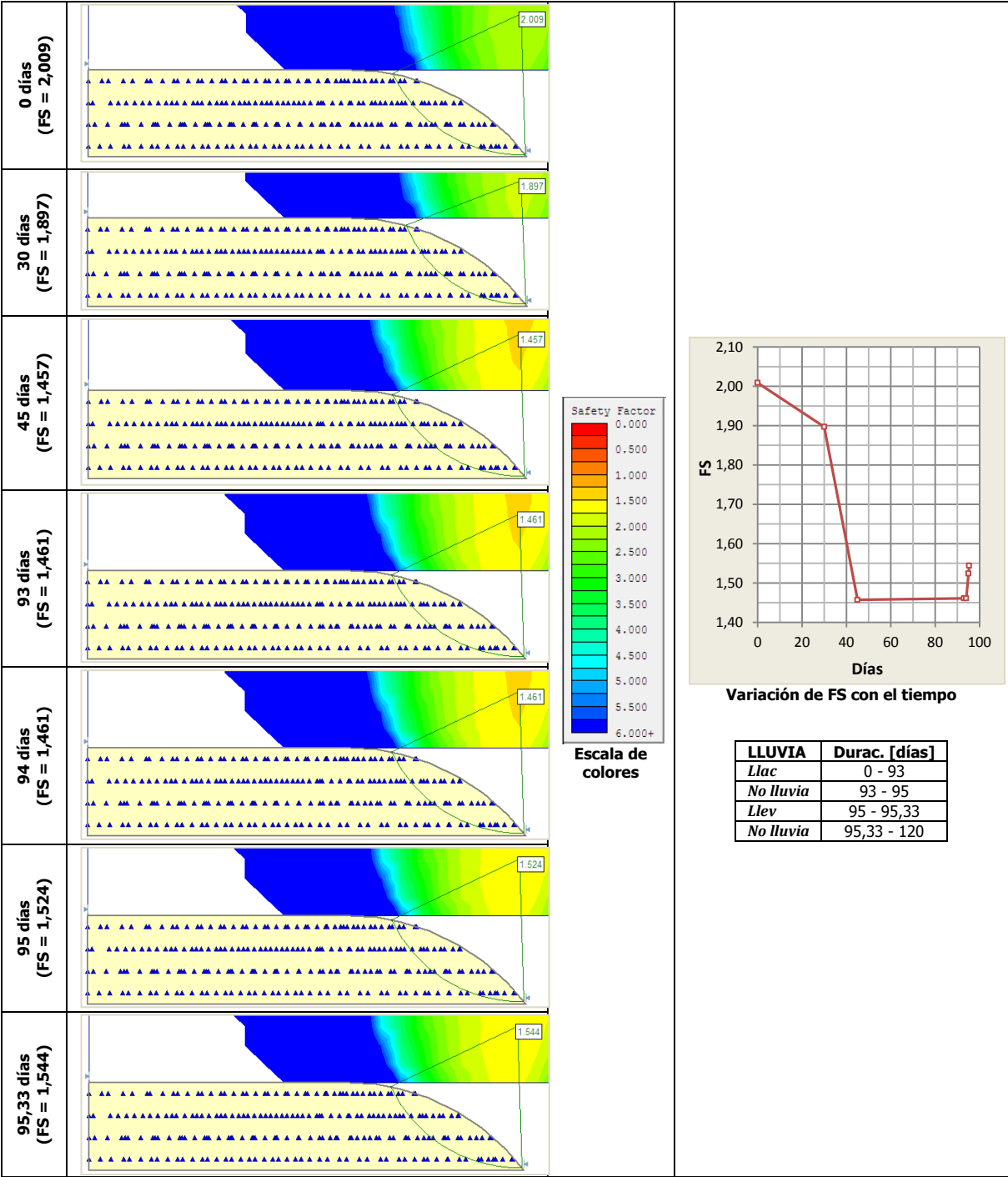


Figura A 2. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 2817 mm (3,029 cm/día – 93 días), *Llev* = 0,8 mm (0,01 cm/h – 8 horas). Forma del talud en perfil: **convexo**. Textura: **Franco limoso**. Método de **Bishop**.

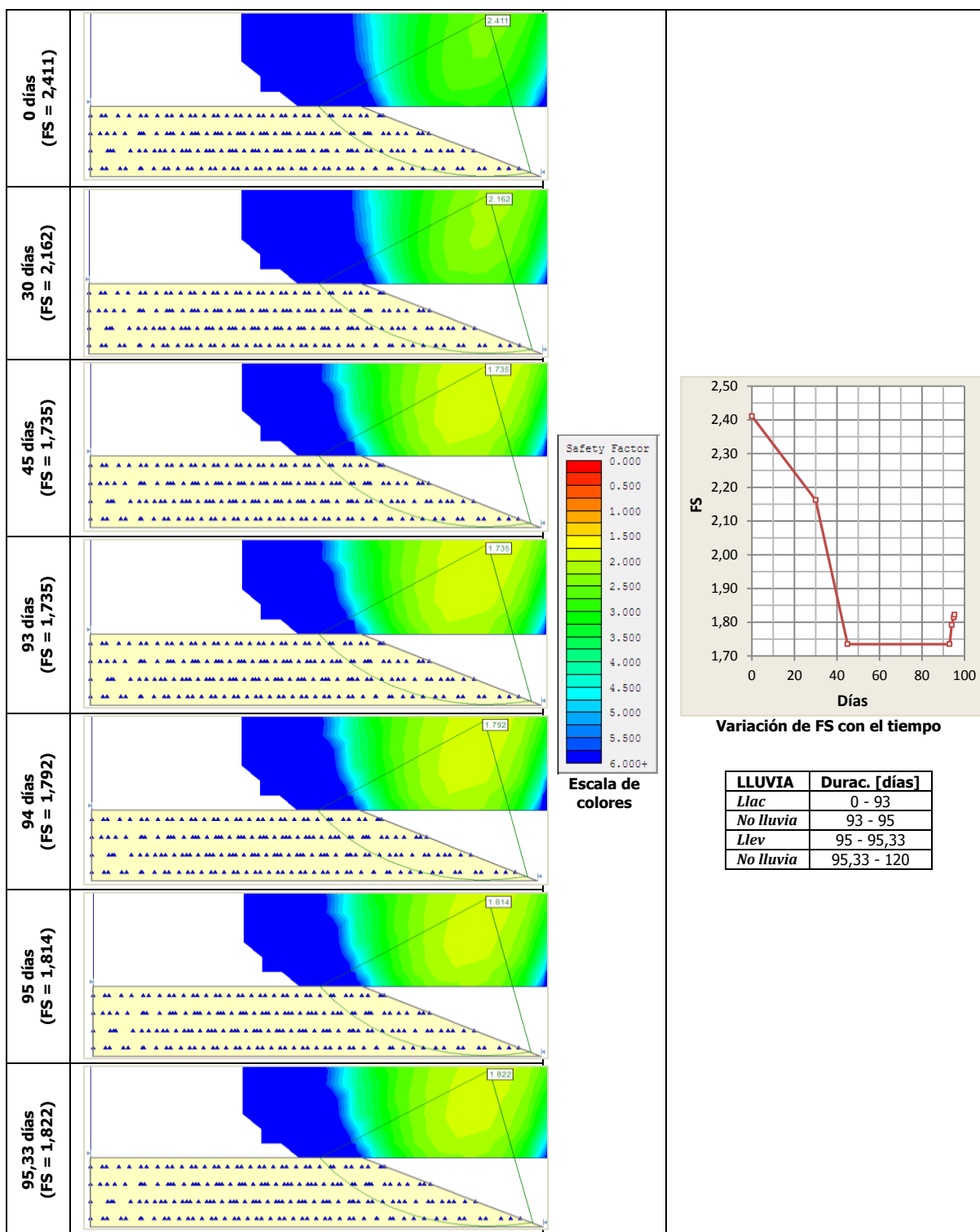


Figura A 3. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 2817 mm (3,029 cm/día – 93 días), *Llev* = 0,8 mm (0,01 cm/h – 8 horas). Forma del talud en perfil: **planar**. Textura: **Franco limoso**. Método de Bishop.

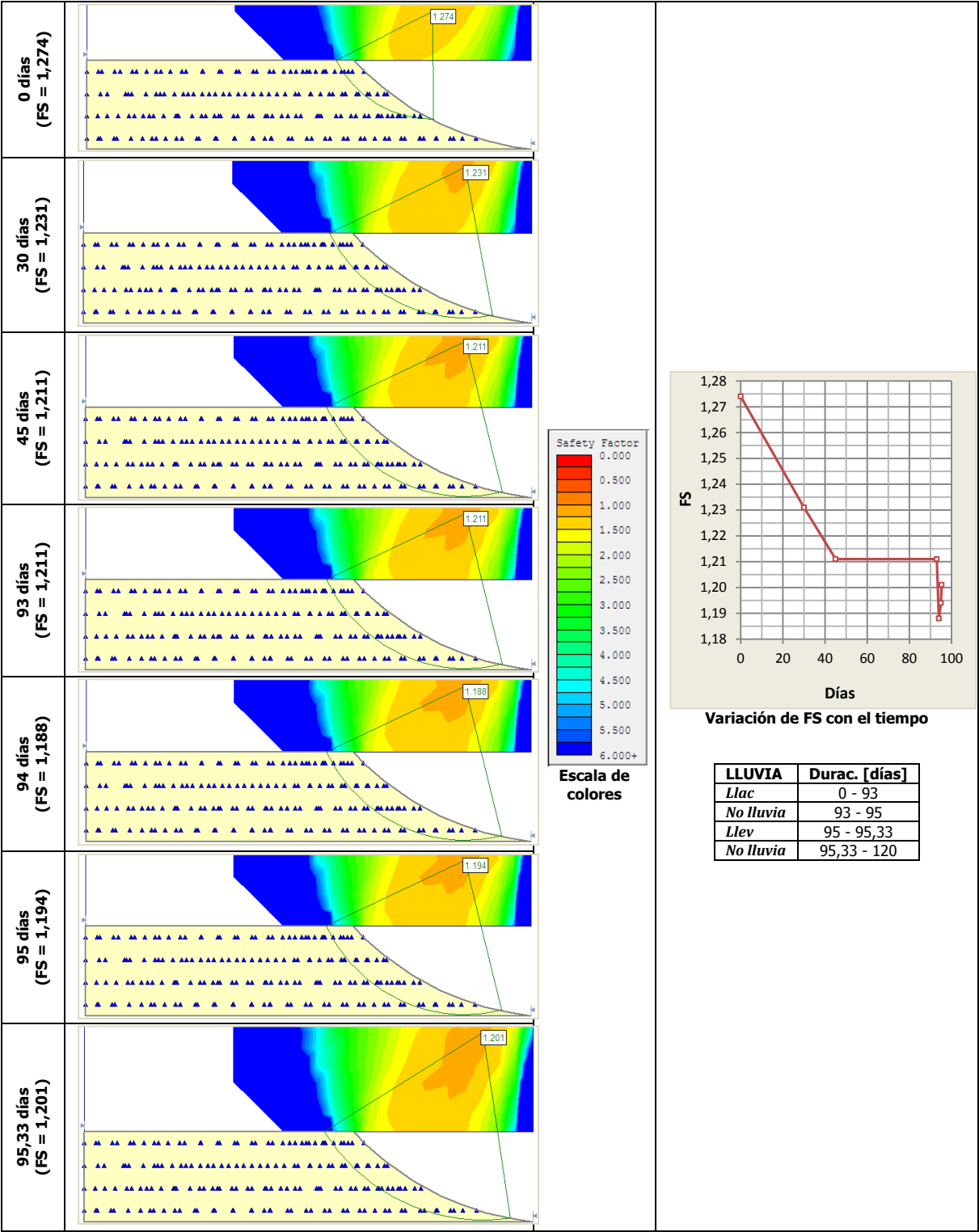


Figura A 4. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 2817 mm (3,029 cm/día – 93 días), *Llev* = 0,8 mm (0,01 cm/h – 8 horas). Forma del talud en perfil: **cóncavo**. Textura: **Areno francoso**. Método de Bishop.

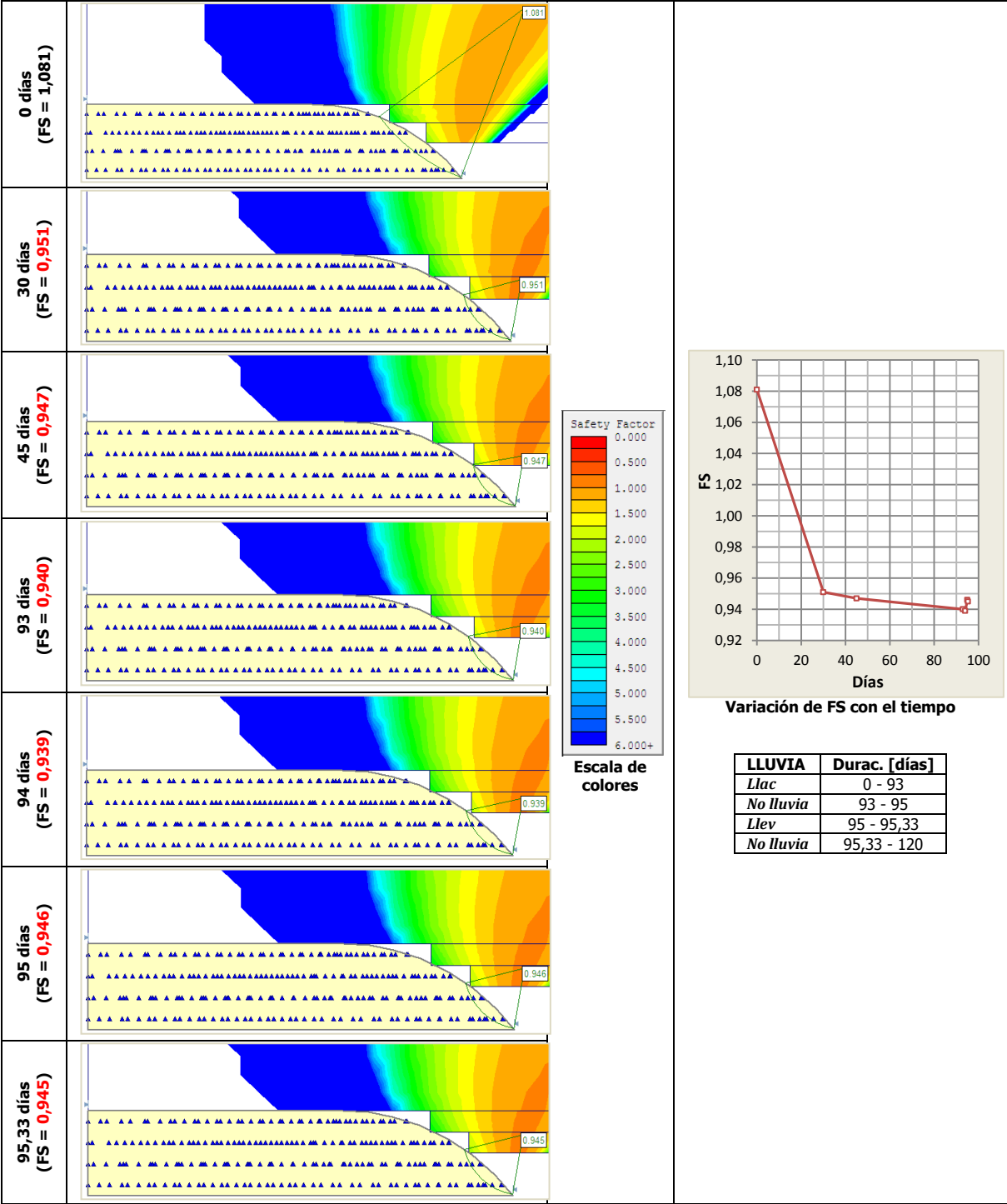


Figura A 5. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 2817 mm (3,029 cm/día – 93 días), *Llev* = 0,8 mm (0,01 cm/h – 8 horas). Forma del talud en perfil: **convexo**. Textura: **Areno francoso**. Método de **Bishop**.

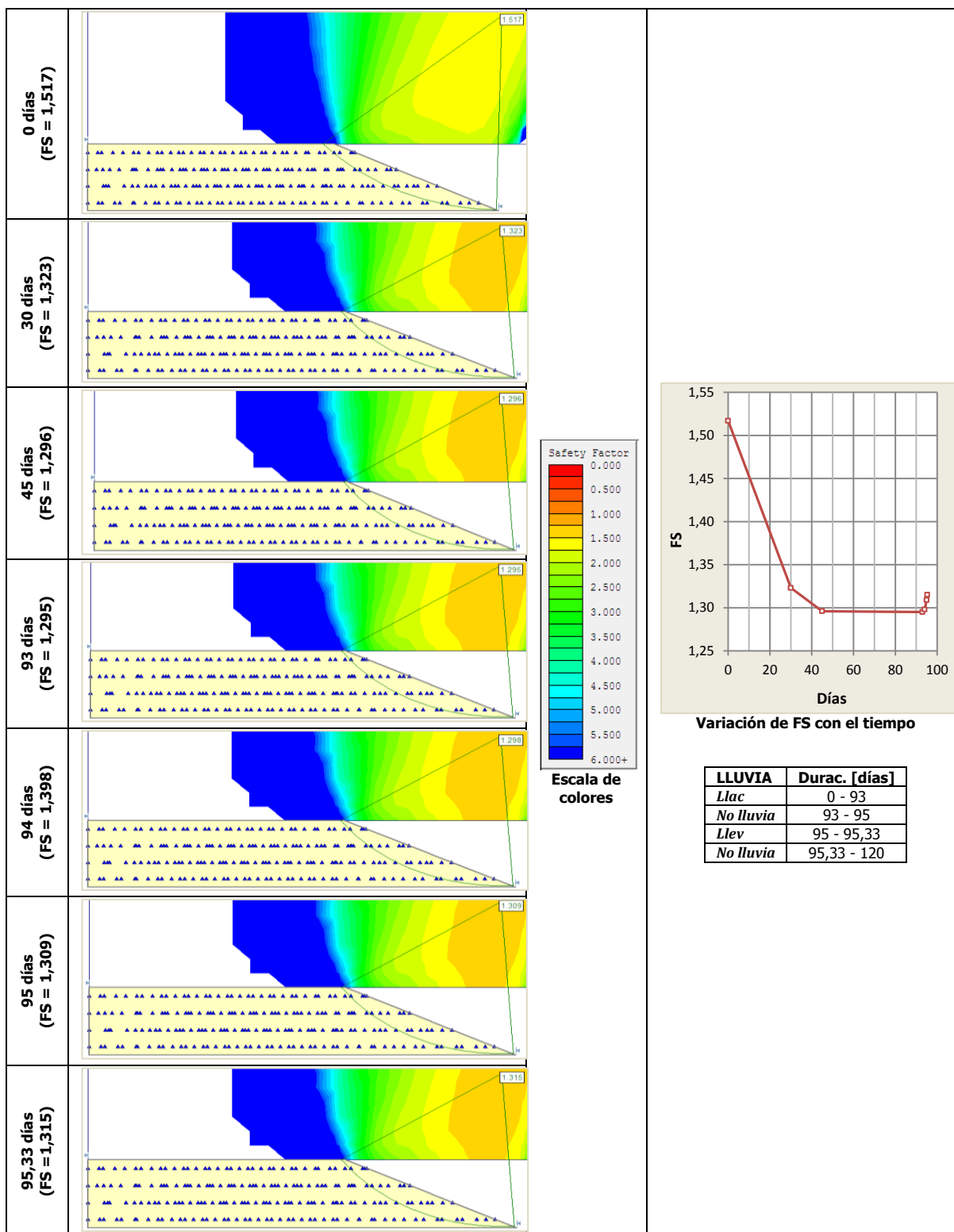


Figura A 6. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 2817 mm (3,029 cm/día – 93 días), *Llev* = 0,8 mm (0,01 cm/h – 8 horas). Forma del talud en perfil: **planar**. Textura: **Areno francoso**. Método de Bishop.

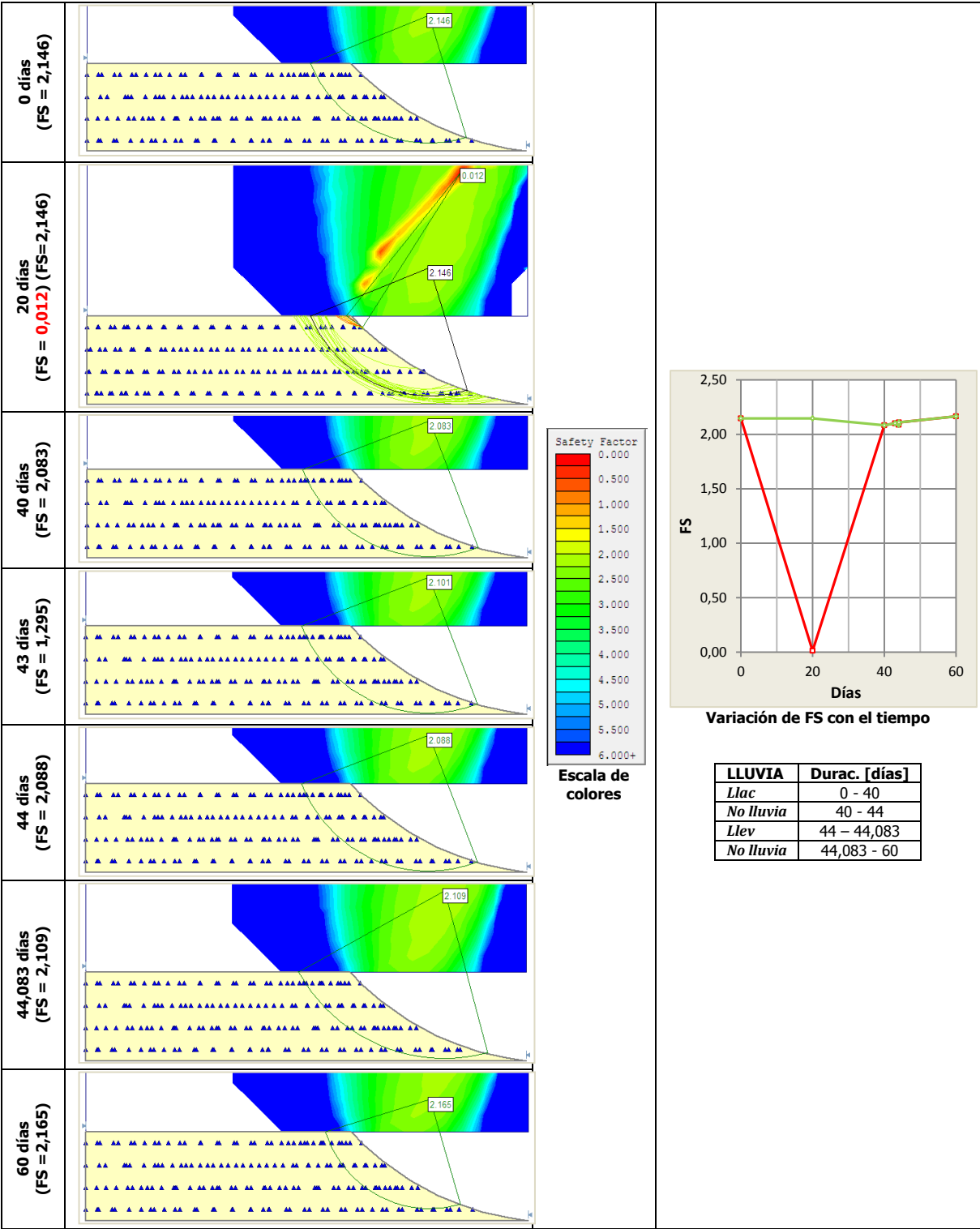


Figura A 7. Variación del FS con el tiempo: *Llac* = 370 mm (0,925 cm/día – 40 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **cóncavo**. Textura: **Franco limoso**. Método de Bishop.

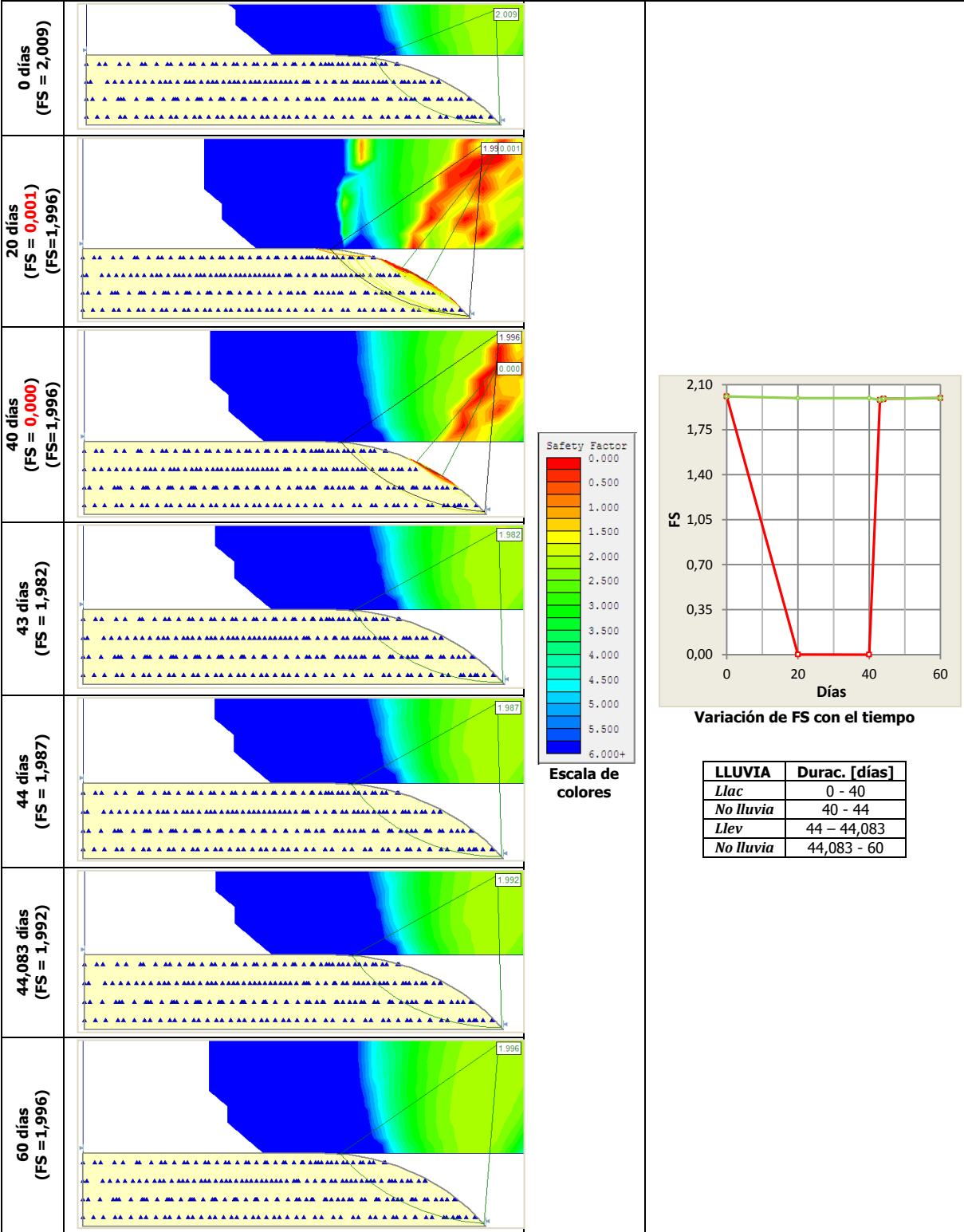


Figura A 8. Variación del FS con el tiempo: *Llac* = 370 mm (0,925 cm/día – 40 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **convexo**. Textura: **Franco limoso**. Método de Bishop.

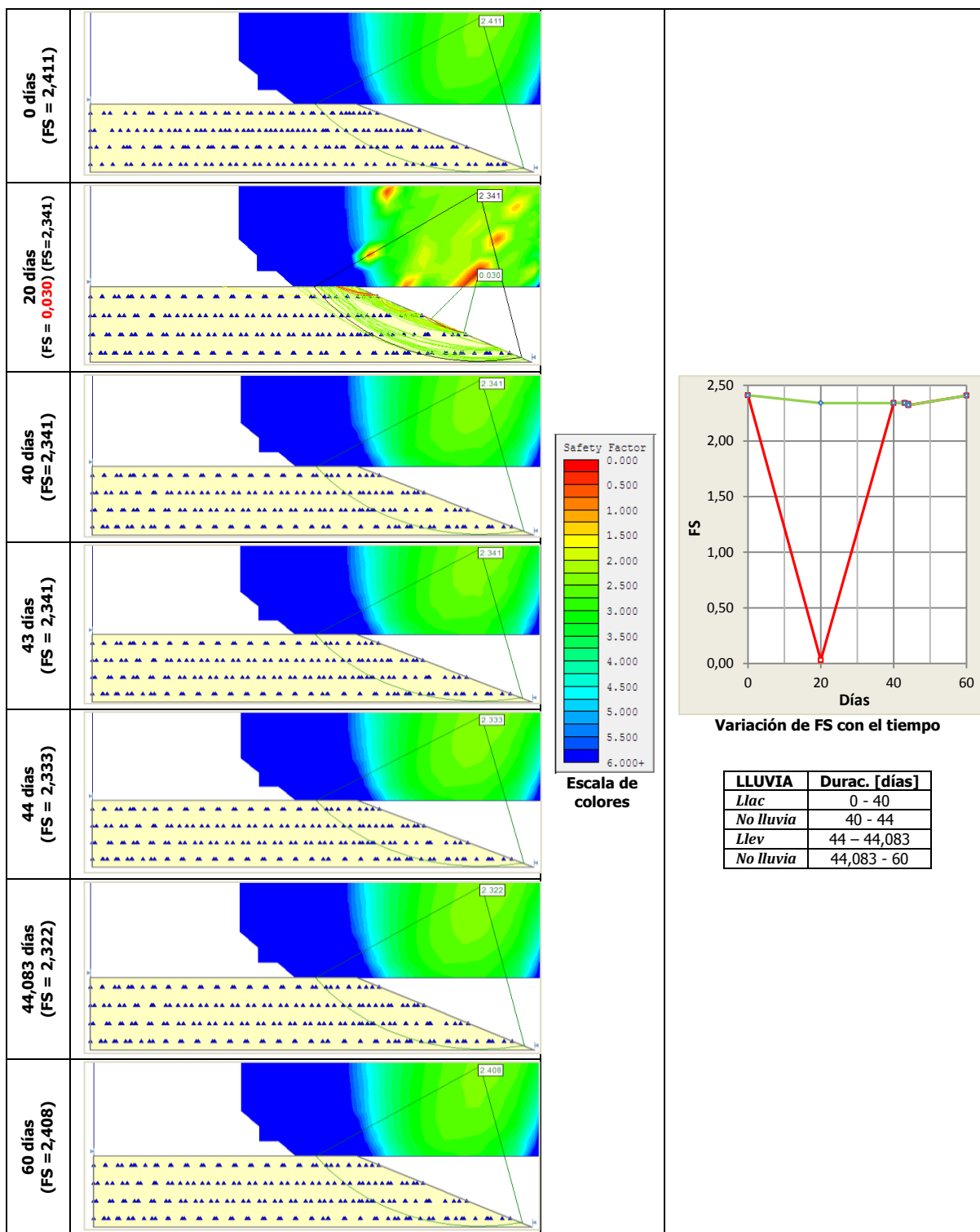


Figura A 9. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 370 mm (0,925 cm/día – 40 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **planar**. Textura: **Franco limoso**. Método de Bishop.

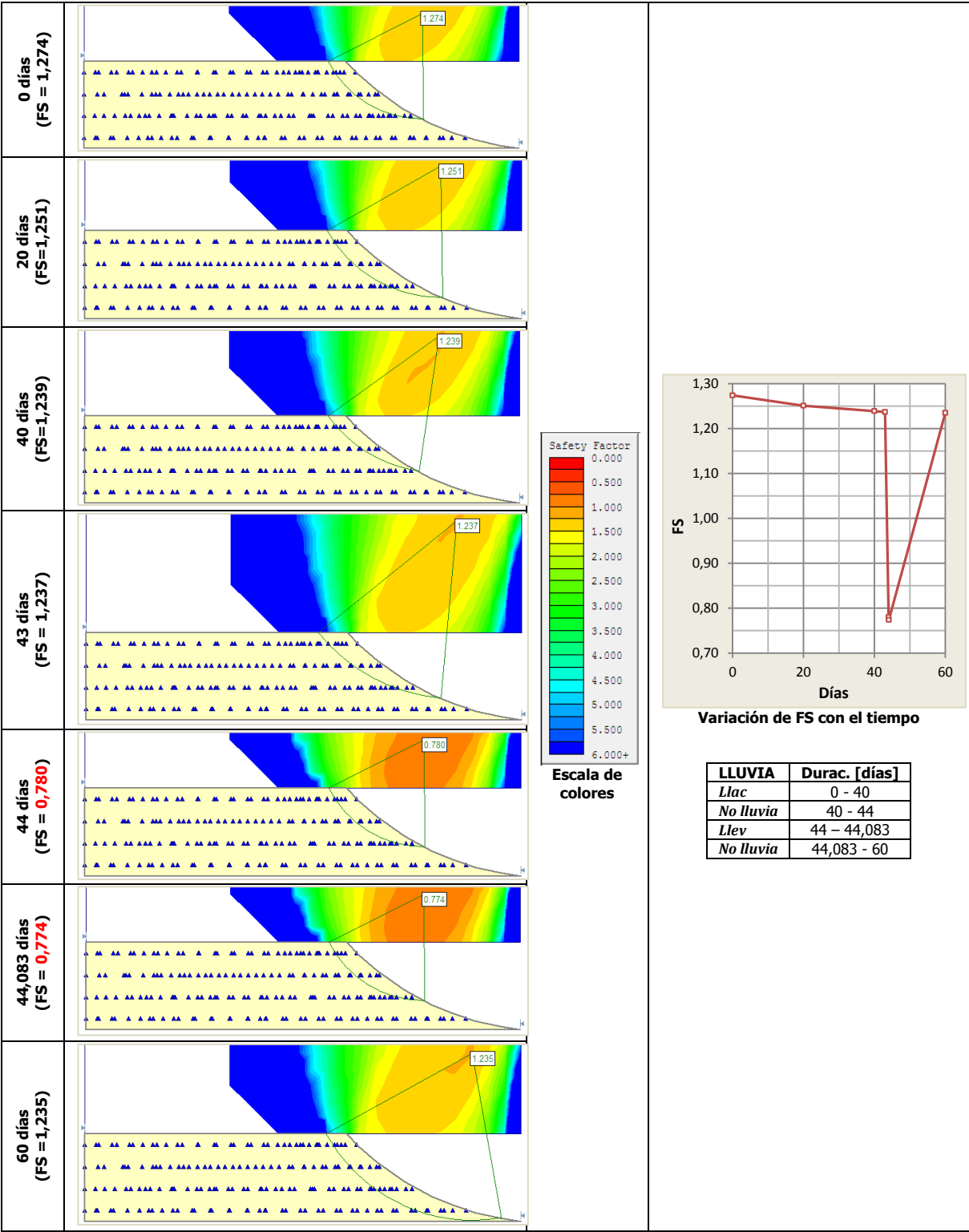


Figura A 10. Variación del FS con el tiempo: *Llac* = 370 mm (0,925 cm/día – 40 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **cóncavo**. Textura: **Areno francoso**. Método de Bishop.

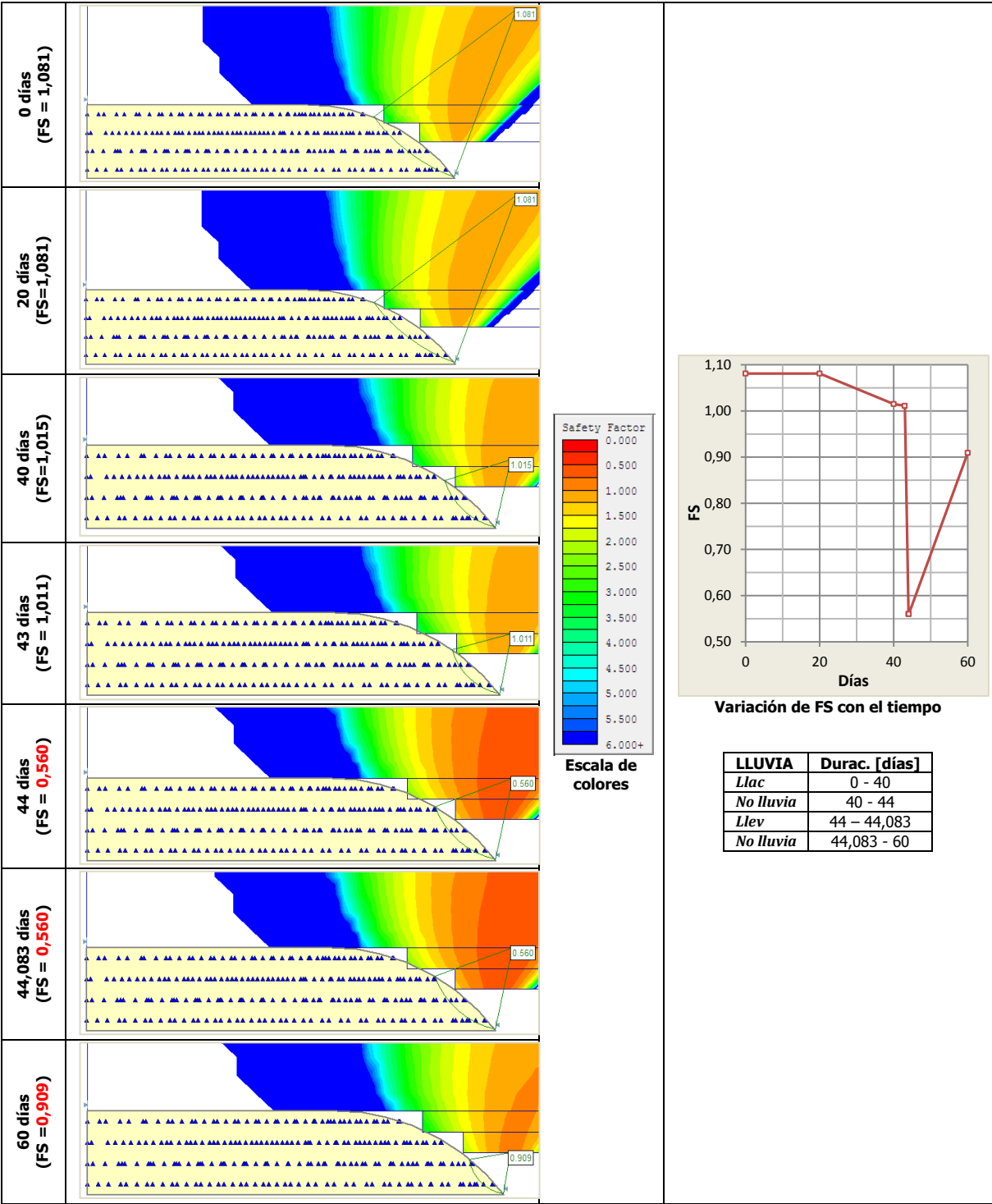


Figura A 11. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 370 mm (0,925 cm/día – 40 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **convexo**. Textura: **Areno francoso**. Método de Bishop.

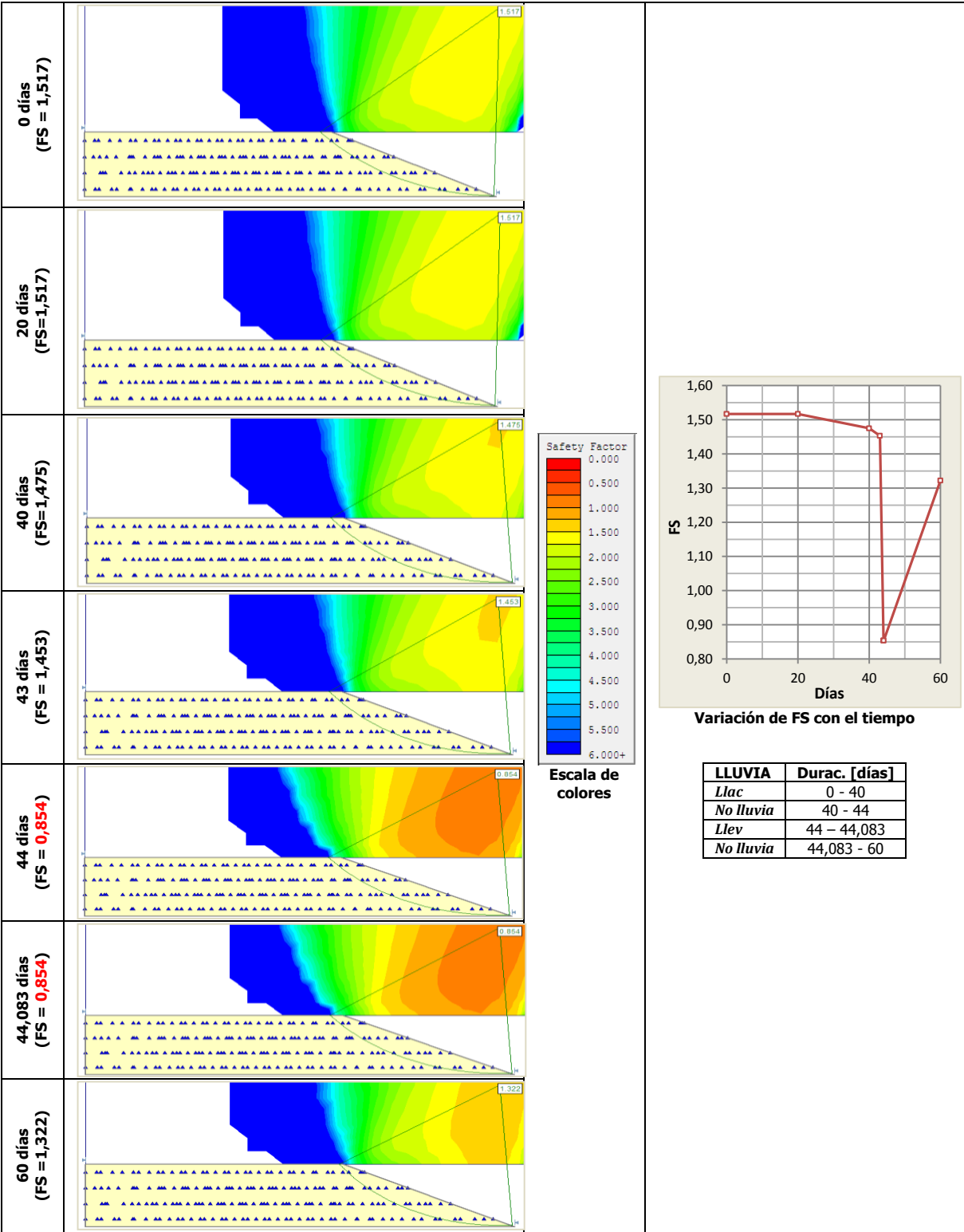


Figura A 12. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 370 mm (0,925 cm/día – 40 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **planar**. Textura: **Areno francoso**. Método de **Bishop**.

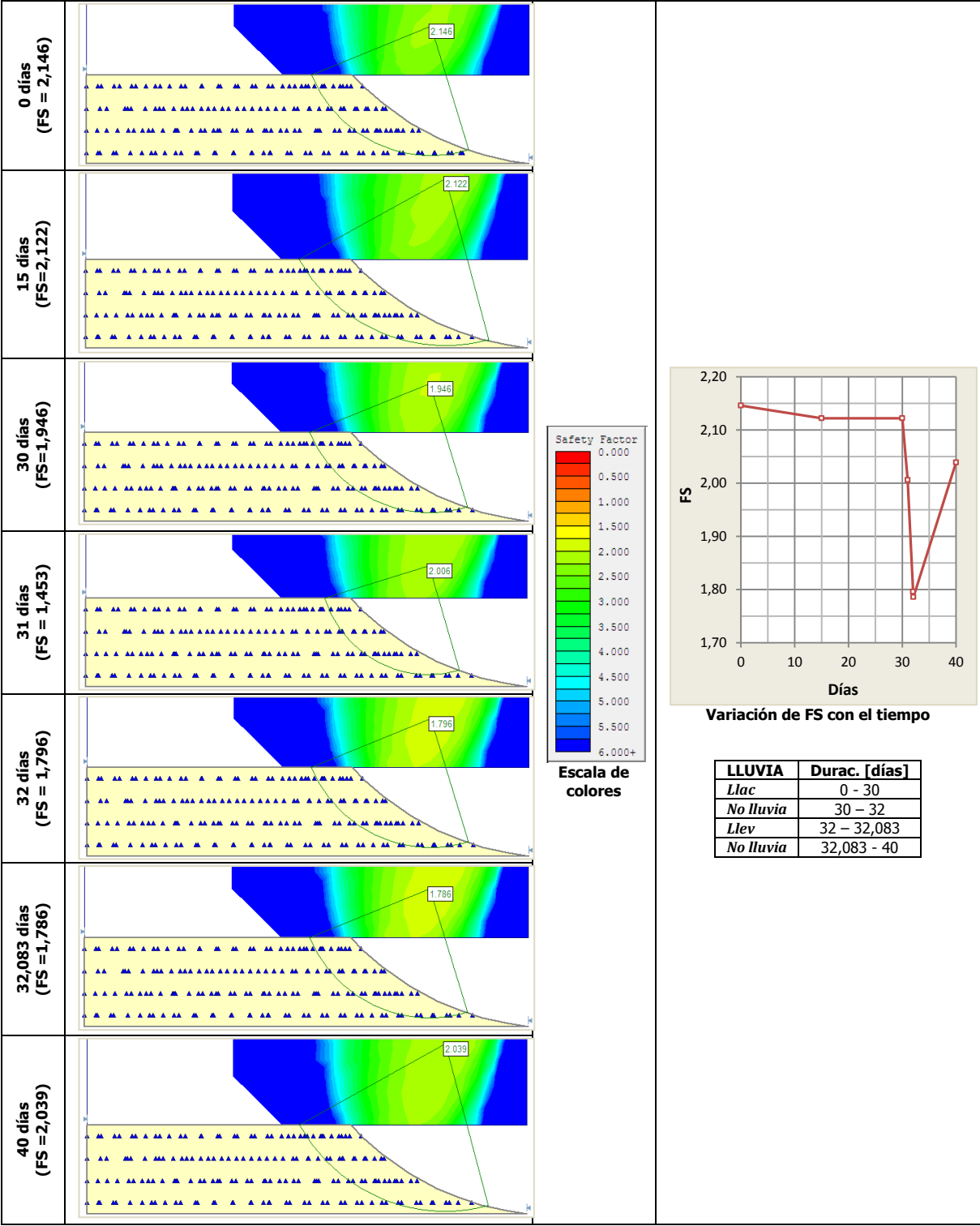


Figura A 13. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 1000 mm (3,333 cm/día – 30 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **cóncavo**. Textura: **Franco limoso**. Método de **Bishop**.

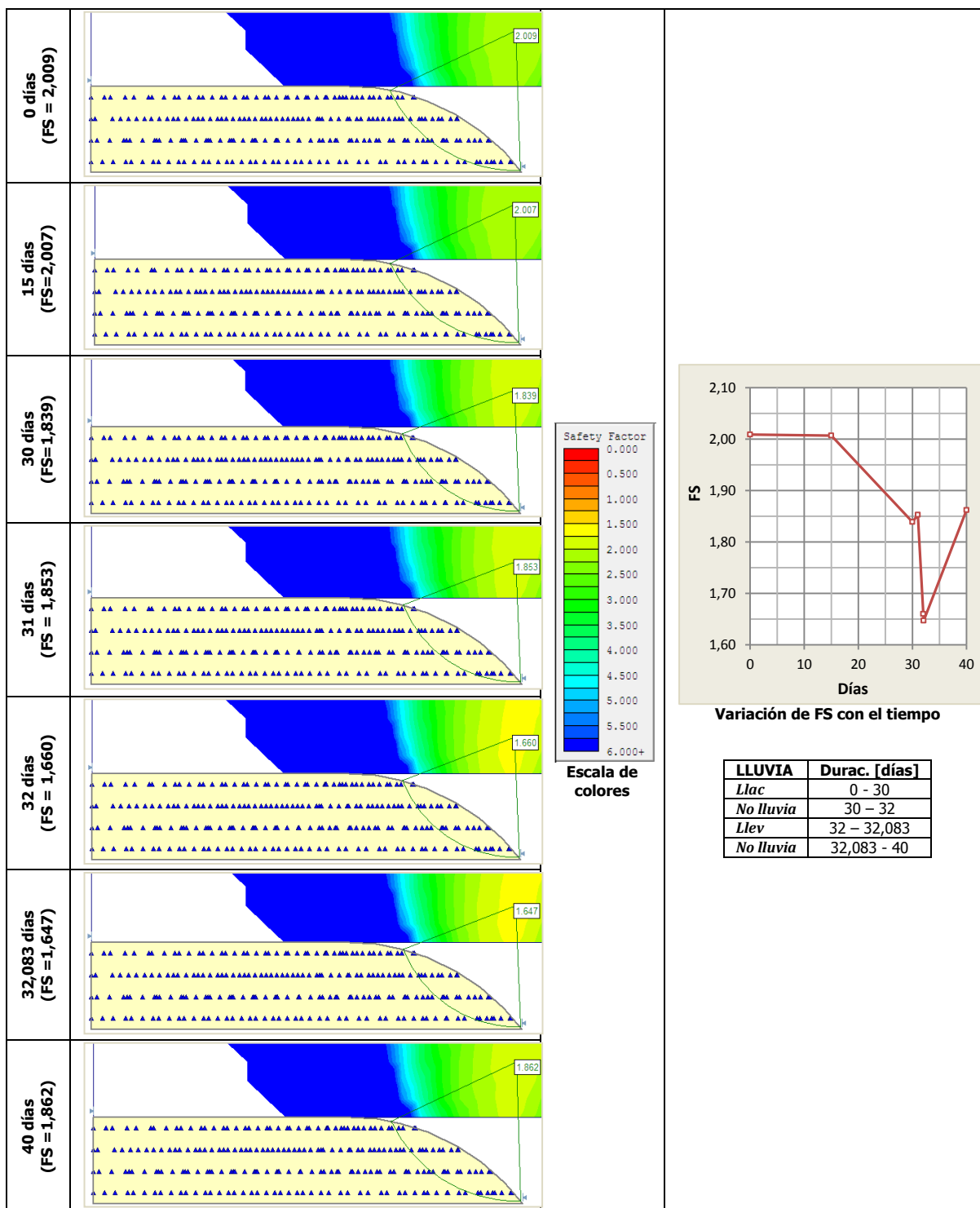


Figura A 14. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 1000 mm (3,333 cm/día – 30 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **convexo**. Textura: **Franco limoso**. Método de **Bishop**.

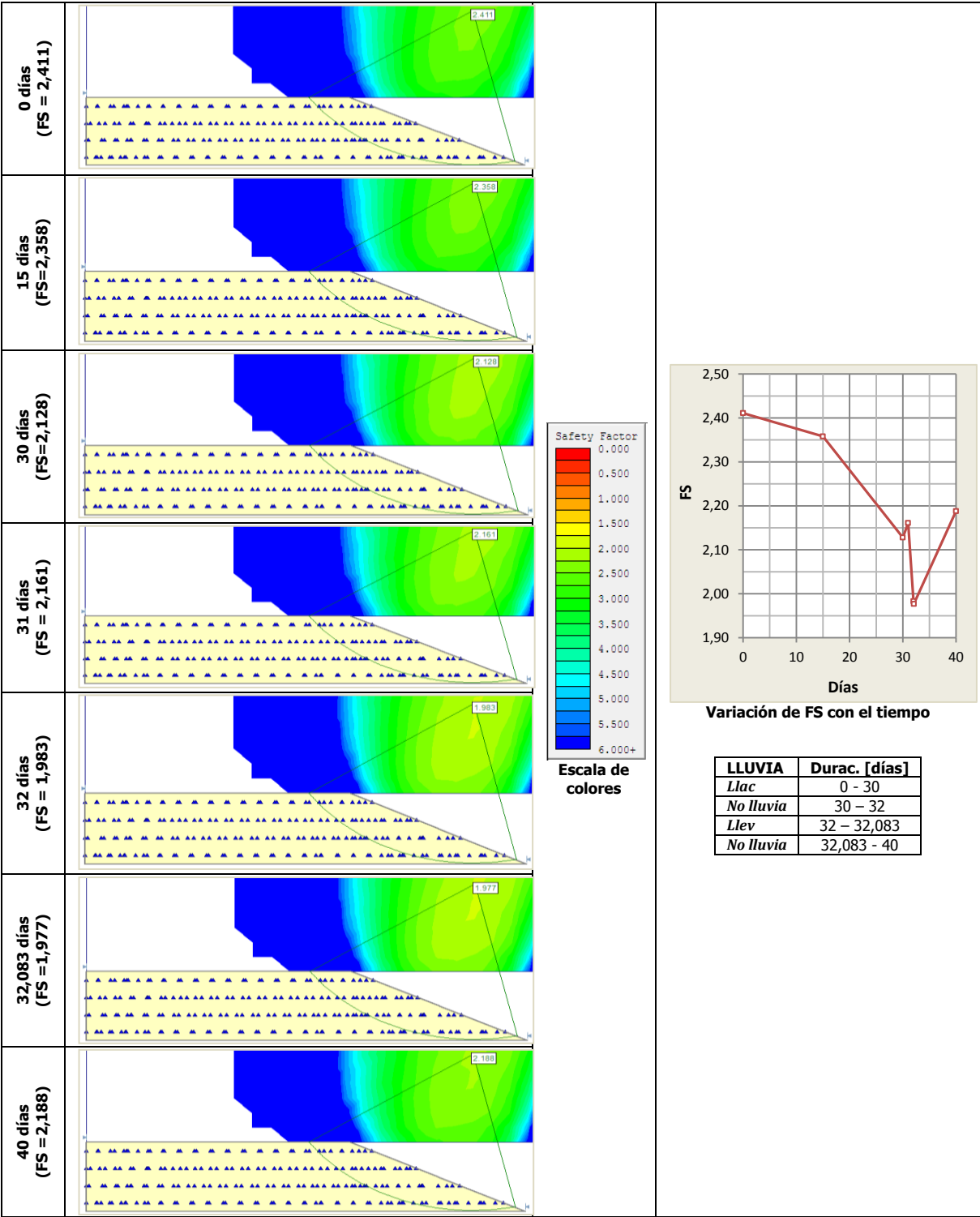


Figura A 15. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 1000 mm (3,333 cm/día – 30 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **planar**. Textura: **Franco limoso**. Método de Bishop.

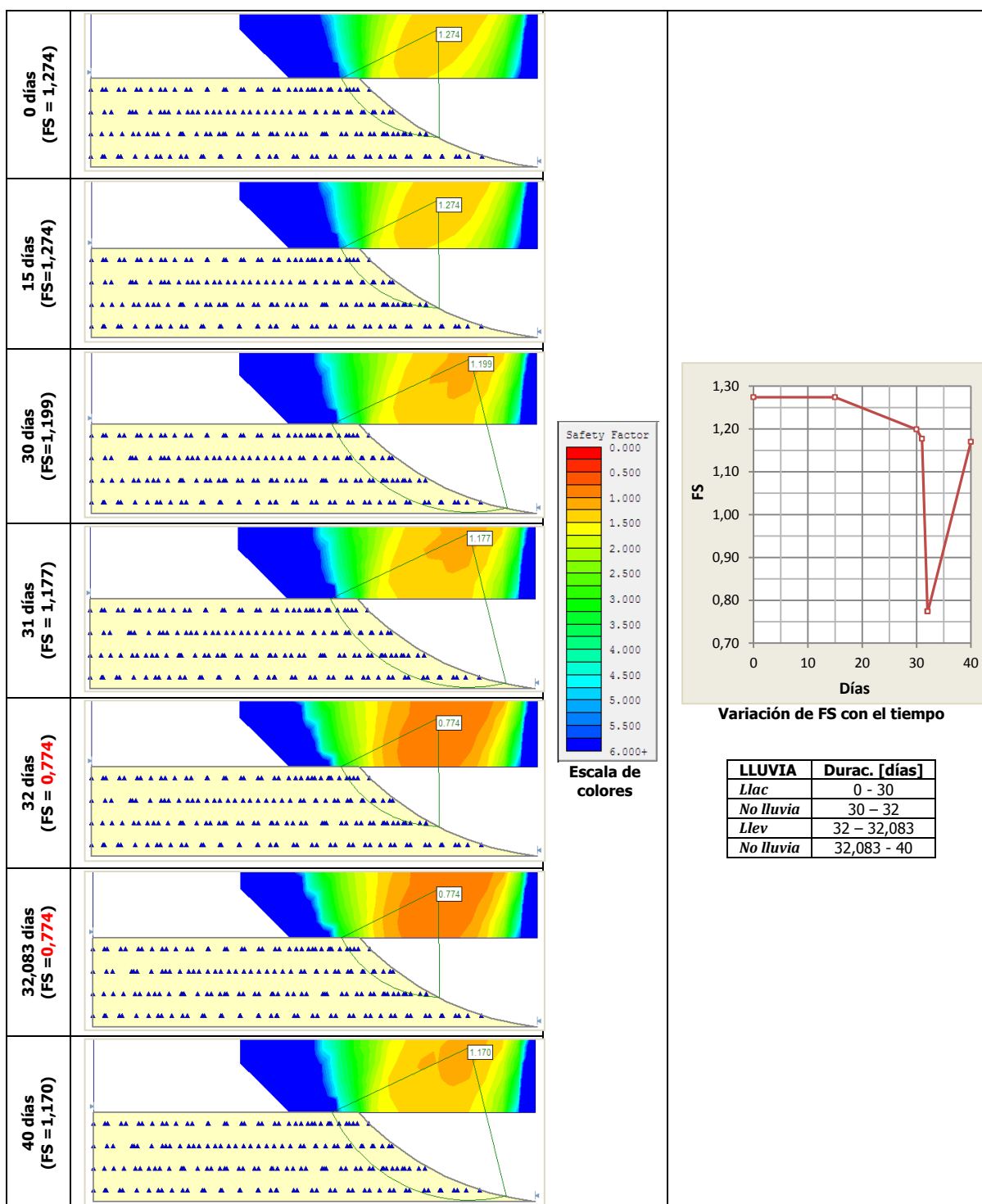


Figura A 16. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 1000 mm (3,333 cm/día – 30 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **cóncavo**. Textura: **Areno francoso**. Método de Bishop.

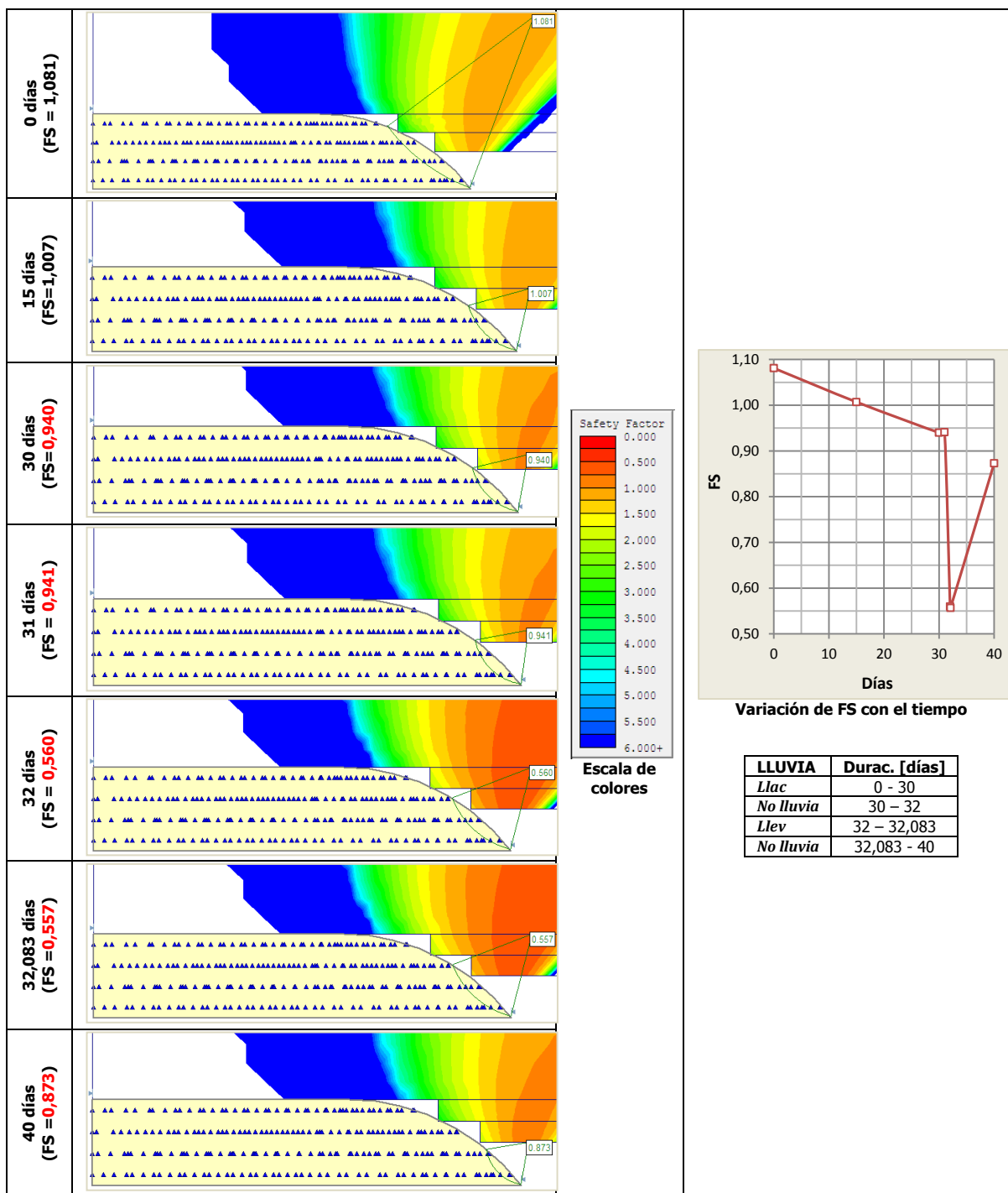


Figura A 17. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 1000 mm (3,333 cm/día – 30 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **convexo**. Textura: **Areno francoso**. Método de Bishop.

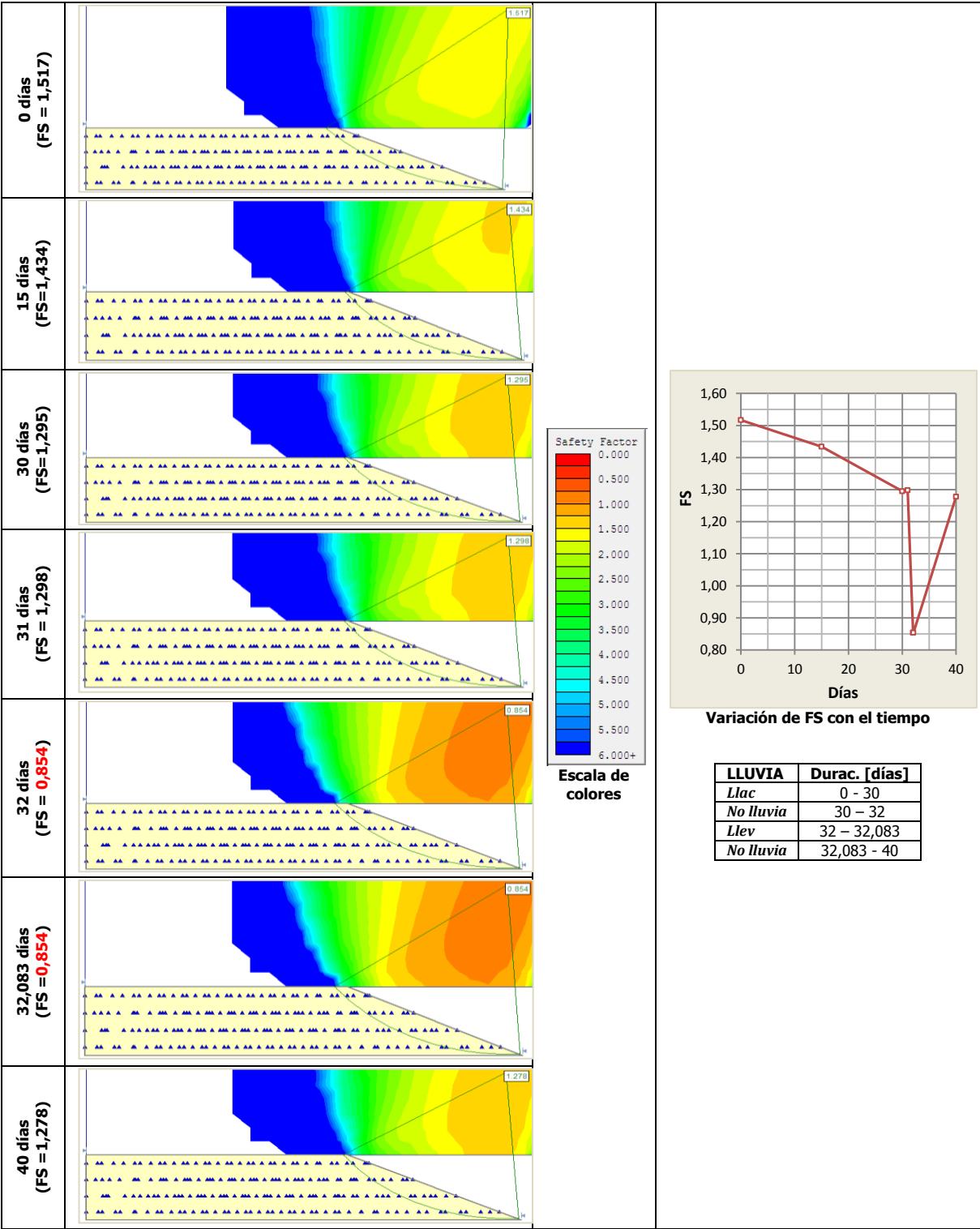


Figura A 18. Variación del FS con el tiempo: *Llac* = 1000 mm (3,333 cm/día – 30 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **planar**. Textura: **Areno francoso**. Método de Bishop.

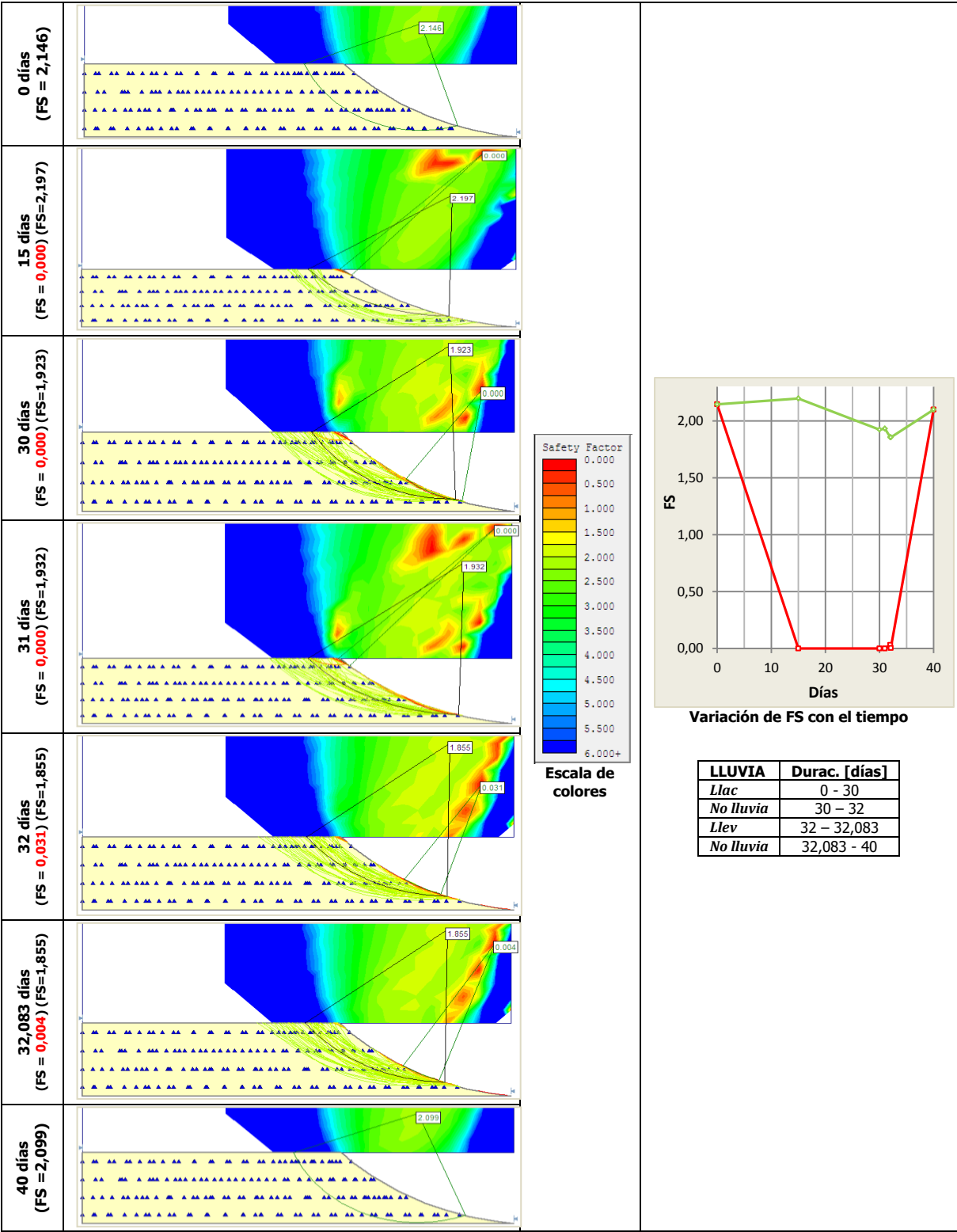


Figura A 19. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 100 mm (0,333 cm/día – 30 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **cóncavo**. Textura: **Franco limoso**. Método de Bishop.

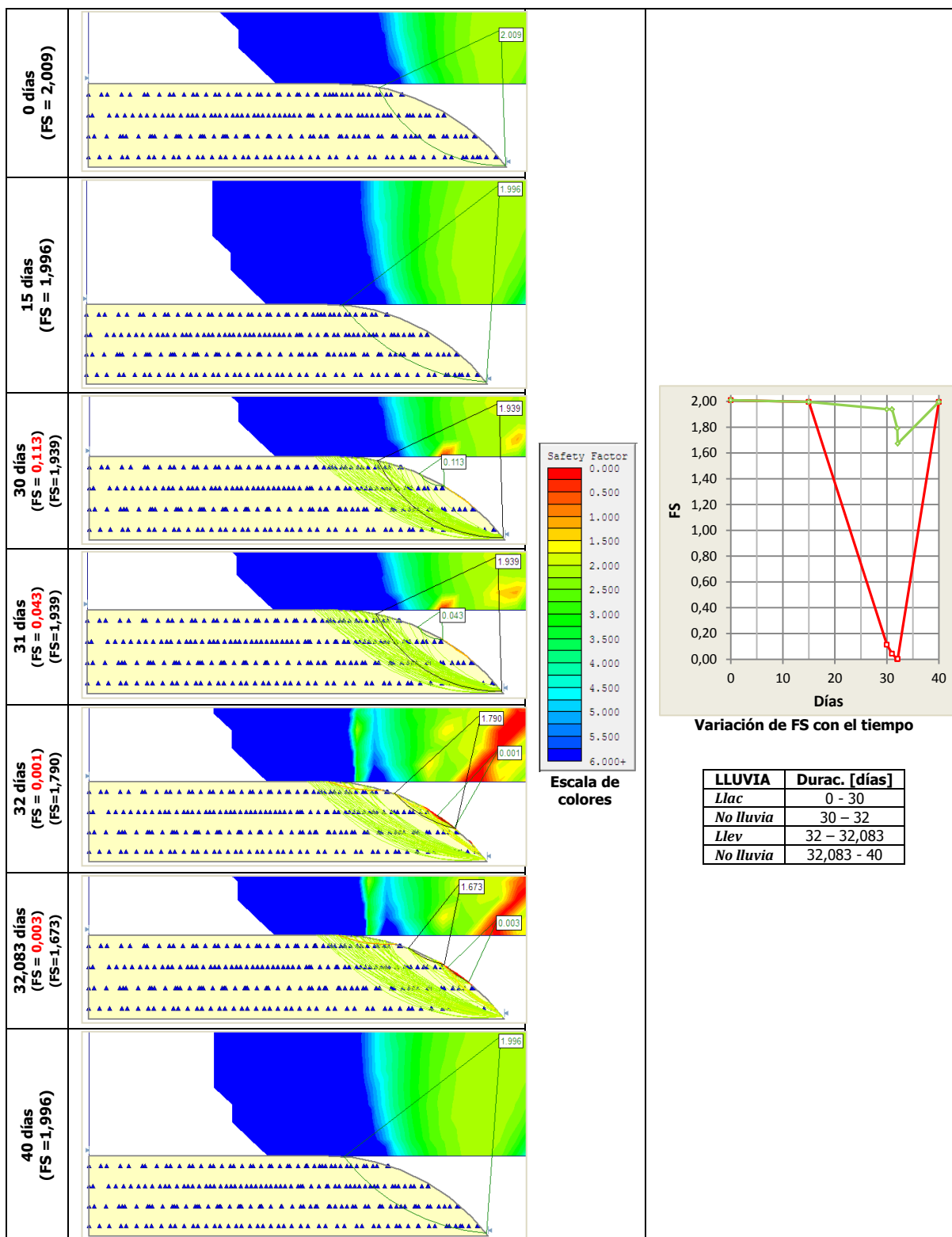


Figura A 20. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 100 mm (0,333 cm/día – 30 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **convexo**. Textura: **Franco limoso**. Método de Bishop.

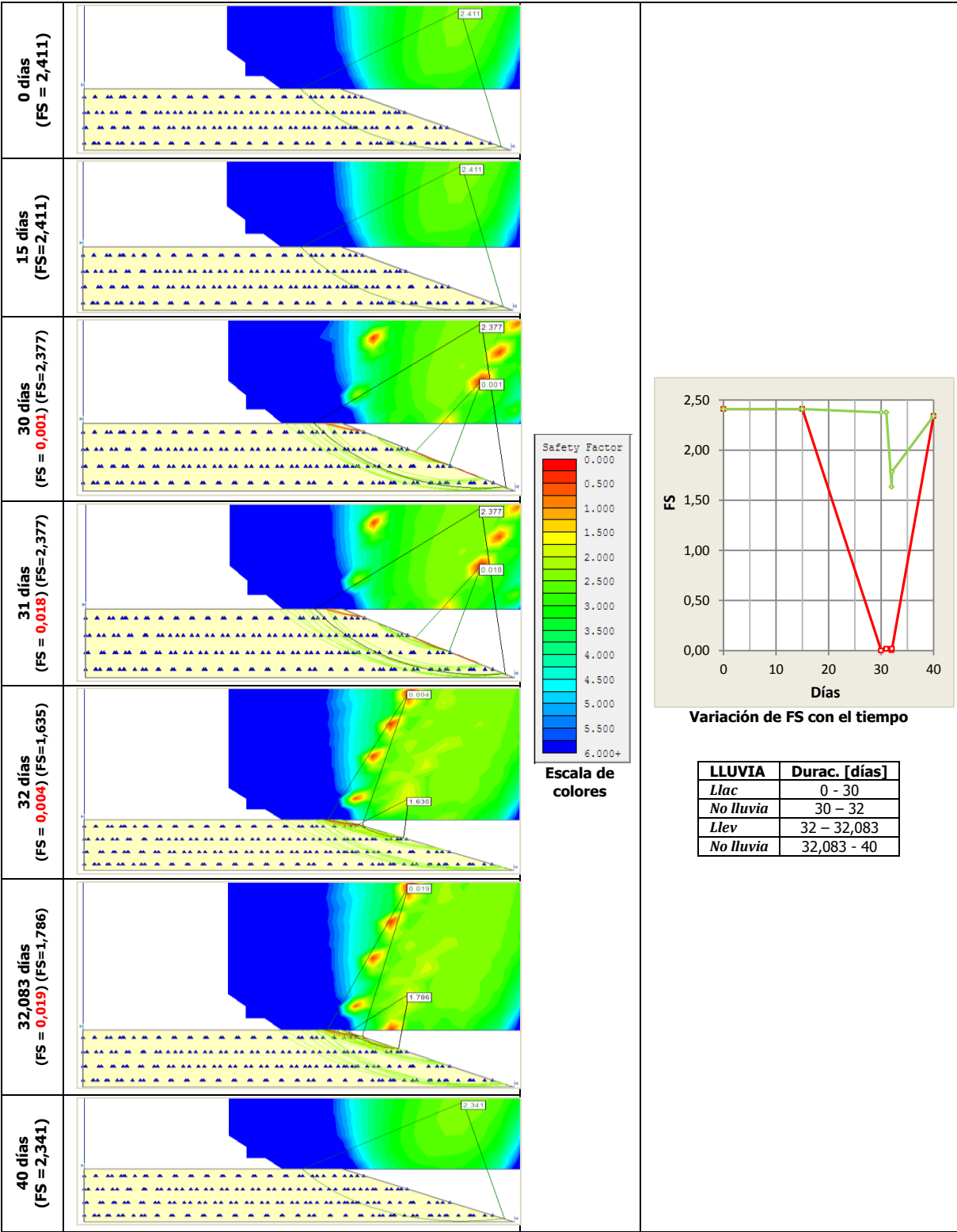


Figura A 21. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 100 mm (0,333 cm/día – 30 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **planar**. Textura: **Franco limoso**. Método de Bishop.

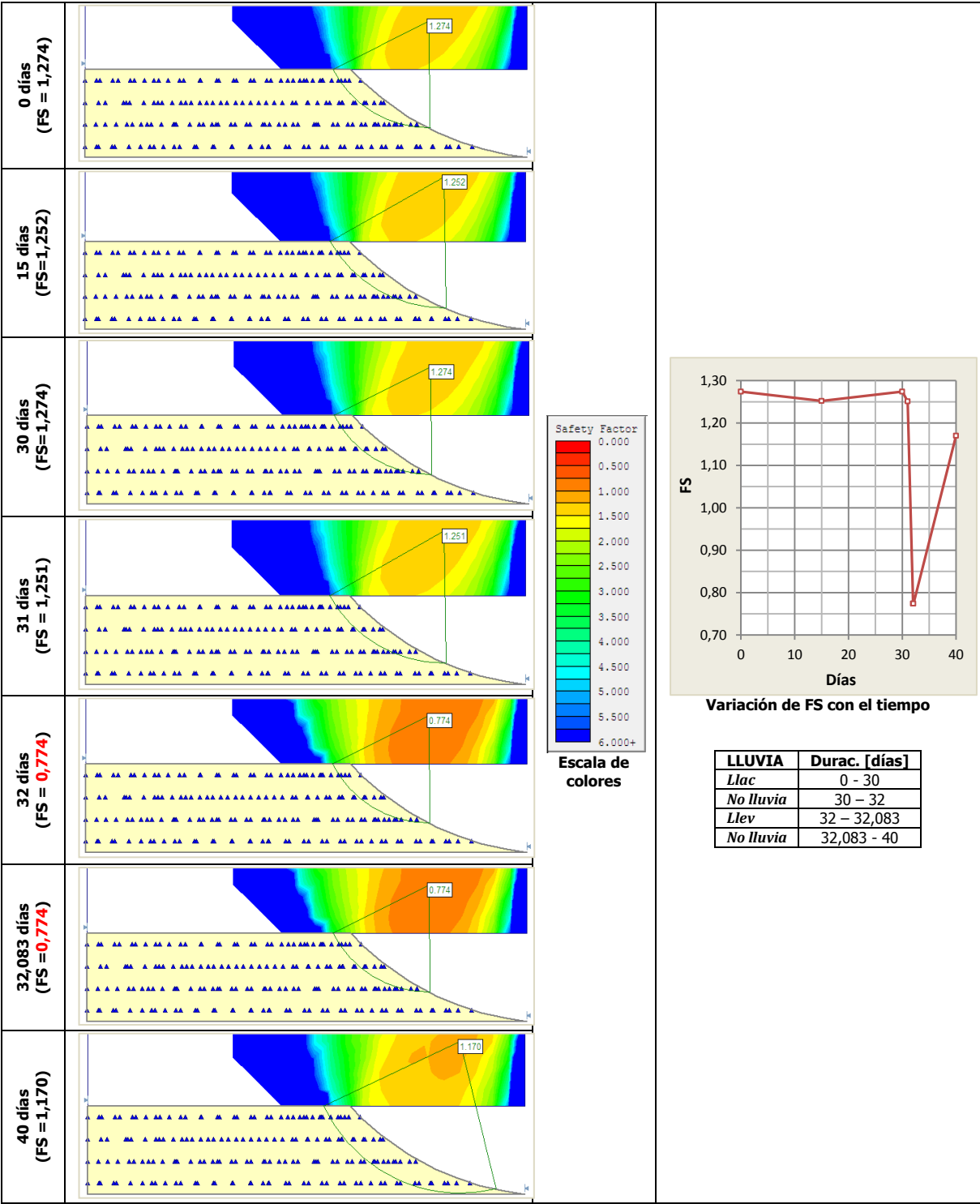


Figura A 22. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 100 mm (0,333 cm/día – 30 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **cóncavo**. Textura: **Areno francoso**. Método de Bishop.

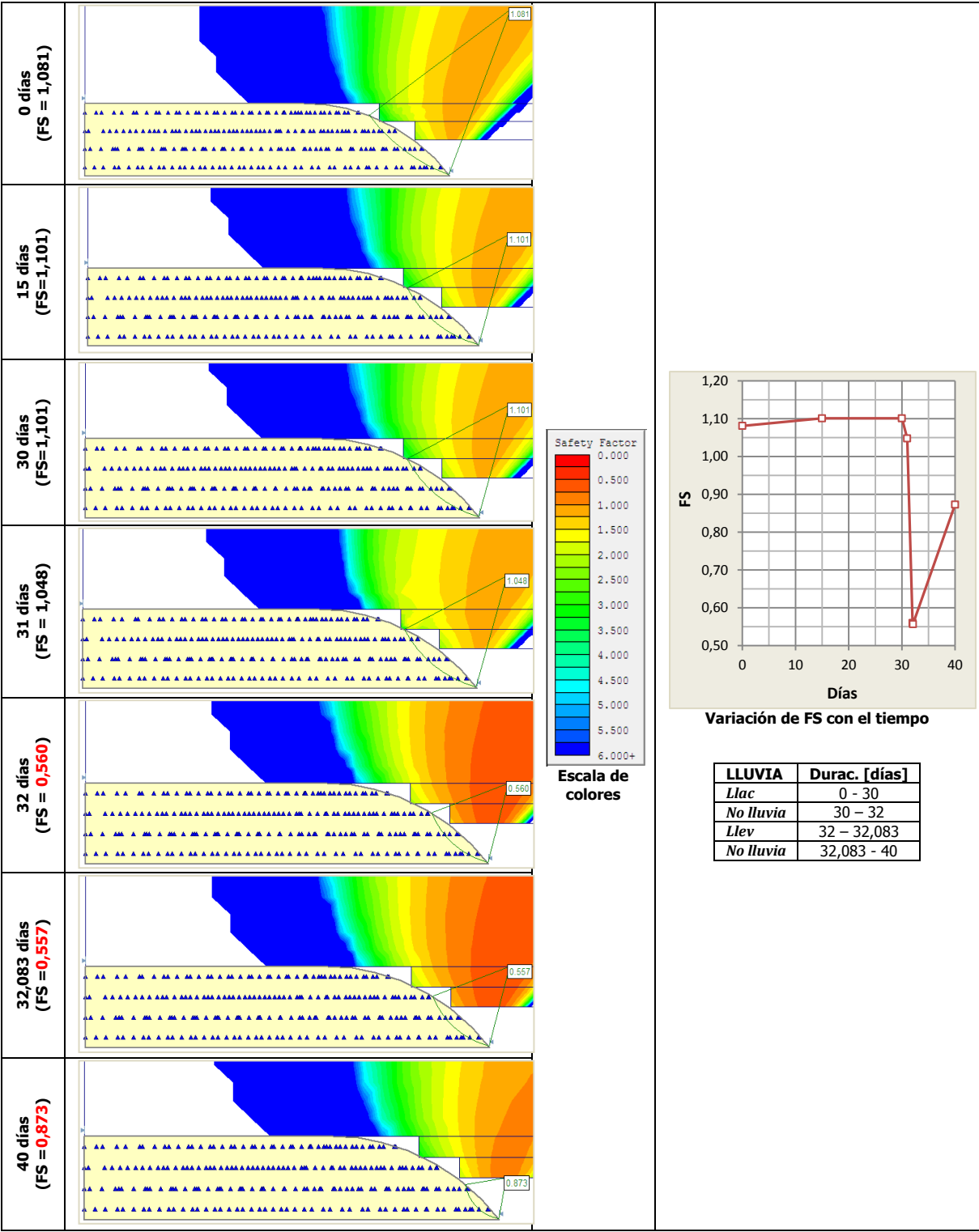


Figura A 23. Variación del FS con el tiempo: *Llac* = 100 mm (0,333 cm/día – 30 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **convexo**. Textura: **Areno francoso**. Método de Bishop.

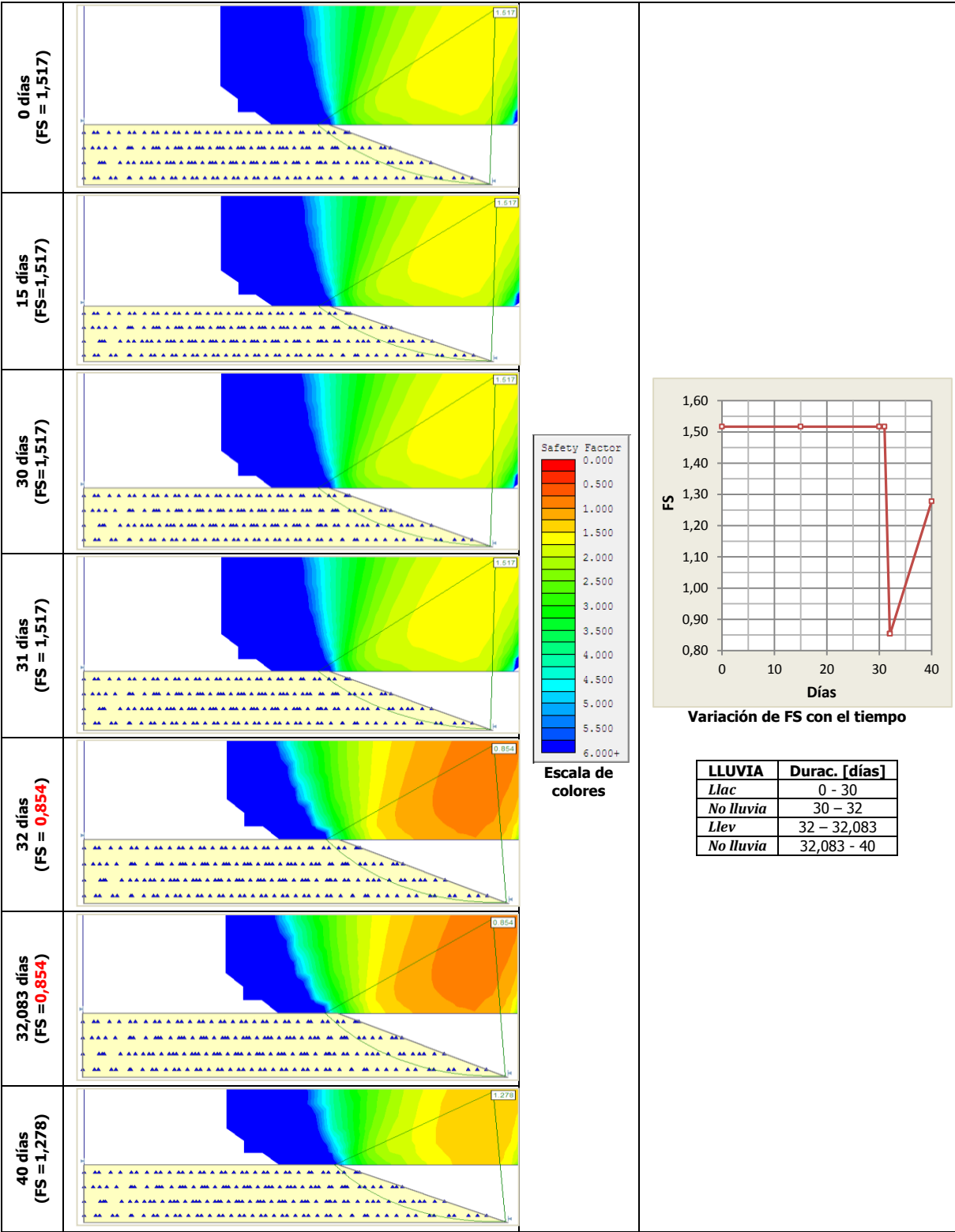


Figura A 24. Variación del *FS* con el tiempo: *Llac* = 100 mm (0,333 cm/día – 30 días), *Llev* = 150 mm (7,5 cm/h – 2 horas). Forma del talud en perfil: **planar**. Textura: **Areno francoso**. Método de Bishop.

DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES INDUCIDOS POR INFILTRACIÓN



Por:
JOHN OCTAVIO ORDUZ GÓMEZ
Código: 2300368

APÉNDICE MAGNÉTICO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA.
BOGOTÁ D.C.
2012

TABLA DE CONTENIDO

1.	APÉNDICE NUMERAL 3.2.1 "MODELACIÓN EN 2-D CON 1 TEXTURA DE SUELO"	1
2.	APÉNDICE NUMERAL 3.2.2 "MODELACIÓN EN 2-D CON VARIAS TEXTURAS DE SUELO"	23
3.	APÉNDICE NUMERAL 3.2.3.1 "Modelación en 2-D usando los umbrales de lluvia de Guzzetti"	51
4.	APÉNDICE NUMERAL 3.2.3.2 "Modelación en 2-D con umbrales de lluvia evento – lluvia acumulada"	62

LISTA DE FIGURAS

FIGURA AM 1.	CABEZAS DE PRESIÓN, ESPESOR DE 0,5 M, IGUAL PARA LAS 12 TEXTURAS DE SUELO.....	1
FIGURA AM 2.	CABEZAS DE PRESIÓN, ESPESOR DE 1,0 M, IGUAL PARA LAS 12 TEXTURAS DE SUELO.....	1
FIGURA AM 3.	CABEZAS DE PRESIÓN, ESPESOR DE 2,0 M, IGUAL PARA LAS 12 TEXTURAS DE SUELO.....	2
FIGURA AM 4.	CABEZAS DE PRESIÓN, ESPESOR DE 2,0 M, IGUAL PARA LAS 12 TEXTURAS DE SUELO.....	2
FIGURA AM 5.	CABEZAS DE PRESIÓN, ESPESOR DE 2,0 M, IGUAL PARA LAS 12 TEXTURAS DE SUELO.....	3
FIGURA AM 6.	CABEZAS DE PRESIÓN, ESPESOR DE 2,0 M, IGUAL PARA LAS 12 TEXTURAS DE SUELO.....	3
FIGURA AM 7.	UBICACIÓN DE LOS 3 NODOS DE CONTROL EN EL CENTRO DEL SUELO, ESPESOR DE SUELO: 0,5 M. ...	4
FIGURA AM 8.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 0,5 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARENA.....	4
FIGURA AM 9.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 0,5 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARENO FRANCOSO.....	4
FIGURA AM 10.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 0,5 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARENOSO.	4
FIGURA AM 11.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 0,5 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO.	5
FIGURA AM 12.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 0,5 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: LIMO.....	5
FIGURA AM 13.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 0,5 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO LIMOSO.....	5
FIGURA AM 14.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 0,5 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLO ARENOSO.	5
FIGURA AM 15.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 0,5 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLOSO.....	6
FIGURA AM 16.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 0,5 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLO LIMOSO.....	6
FIGURA AM 17.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 0,5 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLO ARENOSO.	6
FIGURA AM 18.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 0,5 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLO LIMOSO.	6
FIGURA AM 19.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 0,5 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLA.	7
FIGURA AM 20.	UBICACIÓN DE LOS 3 NODOS DE CONTROL EN EL CENTRO DEL SUELO, ESPESOR DE SUELO: 1,0 M. .	7
FIGURA AM 21.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 1,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARENA.....	7
FIGURA AM 22.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 1,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARENO FRANCOSO.	7
FIGURA AM 23.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 1,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARENOSO.....	8
FIGURA AM 24.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 1,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO.	8
FIGURA AM 25.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 1,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: LIMO.....	8
FIGURA AM 26.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 1,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO LIMOSO.....	8
FIGURA AM 27.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 1,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLO ARENOSO.	9
FIGURA AM 28.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 1,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLOSO.....	9
FIGURA AM 29.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 1,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLO LIMOSO.....	9
FIGURA AM 30.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 1,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLO ARENOSO.	9
FIGURA AM 31.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 1,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLO LIMOSO.....	10
FIGURA AM 32.	VALORES PARA UN ESPESOR DE 1,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLA.	10
FIGURA AM 33.	UBICACIÓN DE LOS 3 NODOS DE CONTROL EN EL CENTRO DEL SUELO, ESPESOR DE SUELO: 2,0 M. 10	

FIGURA AM 34. VALORES PARA UN ESPESOR DE 2,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARENA.....	10
FIGURA AM 35. VALORES PARA UN ESPESOR DE 2,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARENO FRANCOSO.	11
FIGURA AM 36. VALORES PARA UN ESPESOR DE 2,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARENOSO.	11
FIGURA AM 37. VALORES PARA UN ESPESOR DE 2,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO.	11
FIGURA AM 38. VALORES PARA UN ESPESOR DE 2,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: LIMO.....	11
FIGURA AM 39. VALORES PARA UN ESPESOR DE 2,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO LIMOSO.....	12
FIGURA AM 40. VALORES PARA UN ESPESOR DE 2,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLO ARENOSO. ..	12
FIGURA AM 41. VALORES PARA UN ESPESOR DE 2,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLOSO.....	12
FIGURA AM 42. VALORES PARA UN ESPESOR DE 2,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLO LIMOSO.....	12
FIGURA AM 43. VALORES PARA UN ESPESOR DE 2,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLO ARENOSO.	13
FIGURA AM 44. VALORES PARA UN ESPESOR DE 2,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLO LIMOSO.	13
FIGURA AM 45. VALORES PARA UN ESPESOR DE 2,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLA.	13
FIGURA AM 46. UBICACIÓN DE LOS 3 NODOS DE CONTROL EN EL CENTRO DEL SUELO, ESPESOR DE SUELO: 3,0 M. 13	
FIGURA AM 47. VALORES PARA UN ESPESOR DE 3,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARENA.....	14
FIGURA AM 48. VALORES PARA UN ESPESOR DE 3,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARENO FRANCOSO.	14
FIGURA AM 49. VALORES PARA UN ESPESOR DE 3,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARENOSO.	14
FIGURA AM 50. VALORES PARA UN ESPESOR DE 3,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO.	14
FIGURA AM 51. VALORES PARA UN ESPESOR DE 3,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: LIMO.....	15
FIGURA AM 52. VALORES PARA UN ESPESOR DE 3,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO LIMOSO.....	15
FIGURA AM 53. VALORES PARA UN ESPESOR DE 3,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLO ARENOSO. ..	15
FIGURA AM 54. VALORES PARA UN ESPESOR DE 3,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLOSO.....	15
FIGURA AM 55. VALORES PARA UN ESPESOR DE 3,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLO LIMOSO.....	16
FIGURA AM 56. VALORES PARA UN ESPESOR DE 3,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLO ARENOSO.	16
FIGURA AM 57. VALORES PARA UN ESPESOR DE 3,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLO LIMOSO.	16
FIGURA AM 58. VALORES PARA UN ESPESOR DE 3,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLA.	16
FIGURA AM 59. UBICACIÓN DE LOS 6 NODOS DE CONTROL EN EL CENTRO DEL SUELO, ESPESOR DE SUELO: 4,0 M. 17	
FIGURA AM 60. VALORES PARA UN ESPESOR DE 4,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARENA.....	17
FIGURA AM 61. VALORES PARA UN ESPESOR DE 4,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARENO FRANCOSO.	17
FIGURA AM 62. VALORES PARA UN ESPESOR DE 4,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARENOSO.	17
FIGURA AM 63. VALORES PARA UN ESPESOR DE 4,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO.	18
FIGURA AM 64. VALORES PARA UN ESPESOR DE 4,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: LIMO.....	18
FIGURA AM 65. VALORES PARA UN ESPESOR DE 4,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO LIMOSO.....	18
FIGURA AM 66. VALORES PARA UN ESPESOR DE 4,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLO ARENOSO. ..	18
FIGURA AM 67. VALORES PARA UN ESPESOR DE 4,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLOSO.....	19
FIGURA AM 68. VALORES PARA UN ESPESOR DE 4,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLO LIMOSO.....	19
FIGURA AM 69. VALORES PARA UN ESPESOR DE 4,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLO ARENOSO.	19
FIGURA AM 70. VALORES PARA UN ESPESOR DE 4,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLO LIMOSO.	19
FIGURA AM 71. VALORES PARA UN ESPESOR DE 4,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLA.	20
FIGURA AM 72. UBICACIÓN DE LOS 3 NODOS DE CONTROL EN EL CENTRO DEL SUELO, ESPESOR DE SUELO: 5,0 M. 20	
FIGURA AM 73. VALORES PARA UN ESPESOR DE 5,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARENA.....	20
FIGURA AM 74. VALORES PARA UN ESPESOR DE 5,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARENO FRANCOSO.	20
FIGURA AM 75. VALORES PARA UN ESPESOR DE 5,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARENOSO.	21
FIGURA AM 76. VALORES PARA UN ESPESOR DE 5,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO.	21
FIGURA AM 77. VALORES PARA UN ESPESOR DE 5,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: LIMO.....	21

FIGURA AM 78. VALORES PARA UN ESPESOR DE 5,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO LIMOSO.....	21
FIGURA AM 79. VALORES PARA UN ESPESOR DE 5,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLO ARENOSO. ...	22
FIGURA AM 80. VALORES PARA UN ESPESOR DE 5,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLOSO.....	22
FIGURA AM 81. VALORES PARA UN ESPESOR DE 5,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLO LIMOSO.	22
FIGURA AM 82. VALORES PARA UN ESPESOR DE 5,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLO ARENOSO.	22
FIGURA AM 83. VALORES PARA UN ESPESOR DE 5,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLO LIMOSO.	23
FIGURA AM 84. VALORES PARA UN ESPESOR DE 5,0 M, EN UN SUELO DE TEXTURA: ARCILLA.	23
FIGURA AM 85. UBICACIÓN DE 3 NODOS DE CONTROL EN EL CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 4,0 M. FORMA RECTANGULAR.....	23
FIGURA AM 86. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 1 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	24
FIGURA AM 87. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 2 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	24
FIGURA AM 88. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 3 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	24
FIGURA AM 89. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 4 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	25
FIGURA AM 90. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 5 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	25
FIGURA AM 91. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 6 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	25
FIGURA AM 92. UBICACIÓN DE 3 NODOS DE CONTROL EN EL CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 3,0 M. FORMA RECTANGULAR.....	26
FIGURA AM 93. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 1 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	26
FIGURA AM 94. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 2 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	26
FIGURA AM 95. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 3 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	27
FIGURA AM 96. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 4 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	27
FIGURA AM 97. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 5 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	27
FIGURA AM 98. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 6 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	28
FIGURA AM 99. UBICACIÓN DE 3 NODOS DE CONTROL EN EL CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 2,0 M. FORMA RECTANGULAR.....	28
FIGURA AM 100. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 1 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	28
FIGURA AM 101. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 2 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	29
FIGURA AM 102. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 3 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	29
FIGURA AM 103. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 4 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	29
FIGURA AM 104. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 5 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	30
FIGURA AM 105. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 6 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	30
FIGURA AM 106. UBICACIÓN DE 3 NODOS DE CONTROL EN EL CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 1,0 M. FORMA RECTANGULAR.....	30
FIGURA AM 107. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 1 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	31
FIGURA AM 108. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 2 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	31
FIGURA AM 109. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 3 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	31
FIGURA AM 110. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 4 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	32
FIGURA AM 111. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 5 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	32
FIGURA AM 112. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 6 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	32
FIGURA AM 113. UBICACIÓN DE 3 NODOS DE CONTROL, CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 4,0 M. FORMA RECTANGULAR INCLINADA 15°.	33
FIGURA AM 114. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 1 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	33
FIGURA AM 115. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 2 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	33
FIGURA AM 116. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 3 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	34
FIGURA AM 117. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 4 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	34

FIGURA AM 118. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 5 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	34
FIGURA AM 119. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 6 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	35
FIGURA AM 120. UBICACIÓN DE 3 NODOS DE CONTROL, CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 3,0 M. FORMA RECTANGULAR INCLINADA 15°.	35
FIGURA AM 121. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 1 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	35
FIGURA AM 122. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 2 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	36
FIGURA AM 123. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 3 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	36
FIGURA AM 124. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 4 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	36
FIGURA AM 125. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 5 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	37
FIGURA AM 126. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 6 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	37
FIGURA AM 127. UBICACIÓN DE 3 NODOS DE CONTROL, CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 2,0 M. FORMA RECTANGULAR INCLINADA 15°.	37
FIGURA AM 128. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 1 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	38
FIGURA AM 129. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 2 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	38
FIGURA AM 130. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 3 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	38
FIGURA AM 131. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 4 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	39
FIGURA AM 132. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 5 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	39
FIGURA AM 133. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 6 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	39
FIGURA AM 134. UBICACIÓN DE 3 NODOS DE CONTROL, CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 1,0 M. FORMA RECTANGULAR INCLINADA 15°.	40
FIGURA AM 135. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 1 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	40
FIGURA AM 136. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 2 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	40
FIGURA AM 137. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 3 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	41
FIGURA AM 138. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 4 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	41
FIGURA AM 139. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 5 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	41
FIGURA AM 140. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 6 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	42
FIGURA AM 141. UBICACIÓN DE 3 NODOS DE CONTROL, CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 4,0 M. FORMA CURVA INCLINADA 15°.	42
FIGURA AM 142. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 1 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	42
FIGURA AM 143. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 2 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	43
FIGURA AM 144. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 3 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	43
FIGURA AM 145. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 4 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	43
FIGURA AM 146. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 5 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	44
FIGURA AM 147. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 6 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 4,0 M.	44
FIGURA AM 148. UBICACIÓN DE 3 NODOS DE CONTROL, CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 3,0 M. FORMA CURVA INCLINADA 15°.	44
FIGURA AM 149. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 1 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	45
FIGURA AM 150. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 2 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	45
FIGURA AM 151. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 3 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	45
FIGURA AM 152. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 4 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	46
FIGURA AM 153. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 5 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	46
FIGURA AM 154. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 6 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 3,0 M.	46
FIGURA AM 155. UBICACIÓN DE 3 NODOS DE CONTROL, CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 2,0 M. FORMA CURVA INCLINADA 15°.	47
FIGURA AM 156. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 1 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	47

FIGURA AM 157. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 2 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	47
FIGURA AM 158. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 3 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	48
FIGURA AM 159. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 4 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	48
FIGURA AM 160. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 5 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	48
FIGURA AM 161. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 6 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 2,0 M.	49
FIGURA AM 162. UBICACIÓN DE 3 NODOS DE CONTROL, CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 1,0 M. FORMA CURVA INCLINADA 15°.	49
FIGURA AM 163. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 1 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	49
FIGURA AM 164. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 2 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	50
FIGURA AM 165. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 3 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	50
FIGURA AM 166. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 4 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	50
FIGURA AM 167. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 5 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	51
FIGURA AM 168. VALORES PARA LA COMBINACIÓN 6 DE TEXTURAS, ESPESOR DE 1,0 M.	51
FIGURA AM 169. UBICACIÓN DE 6 NODOS DE CONTROL, CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 4,0 M. SUELO FRANCO LIMOSO.	51
FIGURA AM 170. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES 1 A 5 DE INTENSIDAD – DURACIÓN SEGÚN LA TABLA 29, PARA UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO LIMOSO.	52
FIGURA AM 171. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES 6 A 10 DE INTENSIDAD – DURACIÓN SEGÚN LA TABLA 29, PARA UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO LIMOSO.	53
FIGURA AM 172. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES 11 A 15 DE INTENSIDAD – DURACIÓN SEGÚN LA TABLA 29, PARA UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO LIMOSO.	54
FIGURA AM 173. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES 16 Y 17 DE INTENSIDAD – DURACIÓN SEGÚN LA TABLA 29, PARA UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO LIMOSO.	55
FIGURA AM 174. UBICACIÓN DE 6 NODOS DE CONTROL, CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 4,0 M. MITAD SUPERIOR: ARENO FRANCO / MITAD INFERIOR: FRANCO ARCILLOSO.	55
FIGURA AM 175. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LA COMBINACIÓN 1 DE INTENSIDAD – DURACIÓN SEGÚN LA TABLA 29, PARA UN SUELO DE TEXTURA: MITAD SUPERIOR: ARENO FRANCO / MITAD INFERIOR: FRANCO ARCILLOSO.	55
FIGURA AM 176. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES 2 A 6 DE INTENSIDAD – DURACIÓN SEGÚN LA TABLA 29, PARA UN SUELO DE TEXTURA: MITAD SUPERIOR: ARENO FRANCO / MITAD INFERIOR: FRANCO ARCILLOSO.	56
FIGURA AM 177. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES 7 A 11 DE INTENSIDAD – DURACIÓN SEGÚN LA TABLA 29, PARA UN SUELO DE TEXTURA: MITAD SUPERIOR: ARENO FRANCO / MITAD INFERIOR: FRANCO ARCILLOSO.	57
FIGURA AM 178. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES 12 A 16 DE INTENSIDAD – DURACIÓN SEGÚN LA TABLA 29, PARA UN SUELO DE TEXTURA: MITAD SUPERIOR: ARENO FRANCO / MITAD INFERIOR: FRANCO ARCILLOSO.	58
FIGURA AM 179. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LA COMBINACIÓN 17 DE INTENSIDAD – DURACIÓN SEGÚN LA TABLA 29, PARA UN SUELO DE TEXTURA: MITAD SUPERIOR: ARENO FRANCO / MITAD INFERIOR: FRANCO ARCILLOSO.	59
FIGURA AM 180. UBICACIÓN DE 6 NODOS DE CONTROL, CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 4,0 M. MITAD SUPERIOR: FRANCO ARCILLOSO / MITAD INFERIOR: ARENO FRANCO.	59
FIGURA AM 181. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES 1 A 3 DE INTENSIDAD – DURACIÓN SEGÚN LA TABLA 29, PARA UN SUELO DE TEXTURA: MITAD SUPERIOR: FRANCO ARCILLOSO / MITAD INFERIOR: ARENO FRANCO.	59

FIGURA AM 182. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES 4 A 8 DE INTENSIDAD – DURACIÓN SEGÚN LA TABLA 29, PARA UN SUELO DE TEXTURA: MITAD SUPERIOR: FRANCO ARCILLOSO / MITAD INFERIOR: ARENO FRANCO.	60
FIGURA AM 183. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES 9 A 13 DE INTENSIDAD – DURACIÓN SEGÚN LA TABLA 29, PARA UN SUELO DE TEXTURA: MITAD SUPERIOR: FRANCO ARCILLOSO / MITAD INFERIOR: ARENO FRANCO.	61
FIGURA AM 184. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES 14 A 17 DE INTENSIDAD – DURACIÓN SEGÚN LA TABLA 29, PARA UN SUELO DE TEXTURA: MITAD SUPERIOR: FRANCO ARCILLOSO / MITAD INFERIOR: ARENO FRANCO.	62
FIGURA AM 185. UBICACIÓN DE 6 NODOS DE CONTROL, CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 4,0 M. SUELO FRANCO LIMOSO.	63
FIGURA AM 186. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES RESALTADAS DE <i>LLAC</i> – <i>LLEV</i> DE LA TABLA 30, PARA UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO LIMOSO.	63
FIGURA AM 187. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA <i>LLEV</i> SIN <i>LLAC</i> , PARA UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO LIMOSO.	64
FIGURA AM 188. UBICACIÓN DE 6 NODOS DE CONTROL, CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 4,0 M. SUELO ARENO FRANCO.	64
FIGURA AM 189. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES RESALTADAS DE <i>LLAC</i> – <i>LLEV</i> DE LA TABLA 30, PARA UN SUELO DE TEXTURA: ARENO FRANCO.	65
FIGURA AM 190. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA <i>LLEV</i> SIN <i>LLAC</i> , PARA UN SUELO DE TEXTURA: ARENO FRANCO.	65
FIGURA AM 191. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA <i>LLEV</i> SIN <i>LLAC</i> , PARA UN SUELO DE TEXTURA: ARENO FRANCO.	66
FIGURA AM 192. UBICACIÓN DE 6 NODOS DE CONTROL, CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 4,0 M. SUELO FRANCO ARCILLOSO.	66
FIGURA AM 193. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES RESALTADAS DE <i>LLAC</i> – <i>LLEV</i> DE LA TABLA 30, PARA UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLOSO.	66
FIGURA AM 194. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES RESALTADAS DE <i>LLAC</i> – <i>LLEV</i> DE LA TABLA 30, PARA UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLOSO.	67
FIGURA AM 195. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA <i>LLEV</i> SIN <i>LLAC</i> , PARA UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLOSO.	67
FIGURA AM 196. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA <i>LLEV</i> SIN <i>LLAC</i> , PARA UN SUELO DE TEXTURA: FRANCO ARCILLOSO.	68
FIGURA AM 197. UBICACIÓN DE 6 NODOS DE CONTROL, CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 4,0 M. MITAD SUPERIOR: ARENO FRANCO / MITAD INFERIOR: FRANCO ARCILLOSO.	68
FIGURA AM 198. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES RESALTADAS DE <i>LLAC</i> – <i>LLEV</i> DE LA TABLA 30, PARA UN SUELO DE TEXTURA: MITAD SUPERIOR: ARENO FRANCO / MITAD INFERIOR: FRANCO ARCILLOSO.	68
FIGURA AM 199. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES RESALTADAS DE <i>LLAC</i> – <i>LLEV</i> DE LA TABLA 30, PARA UN SUELO DE TEXTURA: MITAD SUPERIOR: ARENO FRANCO / MITAD INFERIOR: FRANCO ARCILLOSO.	69
FIGURA AM 200. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA <i>LLEV</i> SIN <i>LLAC</i> , PARA UN SUELO DE TEXTURA: MITAD SUPERIOR: ARENO FRANCO / MITAD INFERIOR: FRANCO ARCILLOSO.	69
FIGURA AM 201. UBICACIÓN DE 6 NODOS DE CONTROL, CENTRO DEL SUELO, ESPESOR: 4,0 M. MITAD SUPERIOR: FRANCO ARCILLOSO / MITAD INFERIOR: ARENO FRANCO.	70

FIGURA AM 202. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA LAS COMBINACIONES RESALTADAS DE <i>LLAC</i> – <i>LLEV</i> DE LA TABLA 30, PARA UN SUELO DE TEXTURA: MITAD SUPERIOR: FRANCO ARCILLOSO / MITAD INFERIOR: ARENO FRANCOSO.	70
FIGURA AM 203. VALORES DE ψ ALCANZADOS PARA <i>LLEV</i> SIN <i>LLAC</i> , PARA UN SUELO DE TEXTURA: MITAD SUPERIOR: FRANCO ARCILLOSO / MITAD INFERIOR: ARENO FRANCOSO.	71

1. APÉNDICE NUMERAL 3.2.1 "MODELACIÓN EN 2-D CON 1 TEXTURA DE SUELO"

Cada una de las siguientes 6 figuras, representan las cabezas de presión " ψ " alcanzadas para las 12 texturas de suelo, modelando 6 espesores diferentes (72 modelaciones). Para las 12 texturas de suelo se obtienen los mismos 6 rangos y 6 distribuciones de cabezas de presión " ψ ", para los 6 espesores diferentes; cada una de las 12 texturas alcanza el mismo rango y distribución de cabezas de presión " ψ " en tiempos diferentes. $\psi_i = -100$ cm.

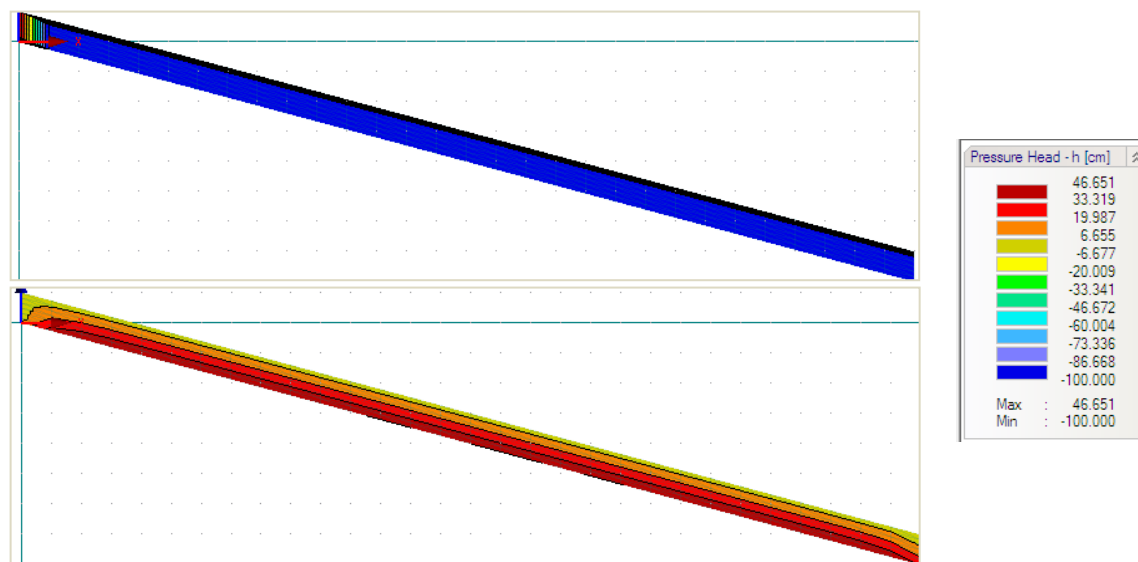


Figura AM 1. Cabezas de presión, espesor de 0,5 m, igual para las 12 texturas de suelo.
Superior. Distribución inicial. *Inferior.* Distribución final.

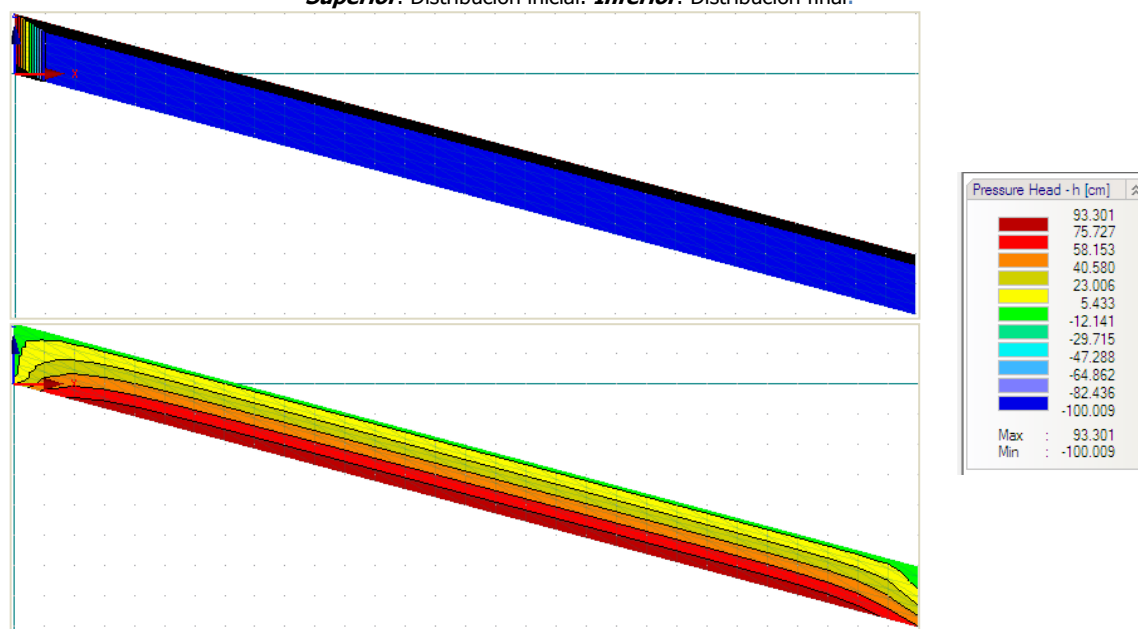


Figura AM 2. Cabezas de presión, espesor de 1,0 m, igual para las 12 texturas de suelo.
Superior. Distribución inicial. *Inferior.* Distribución final.

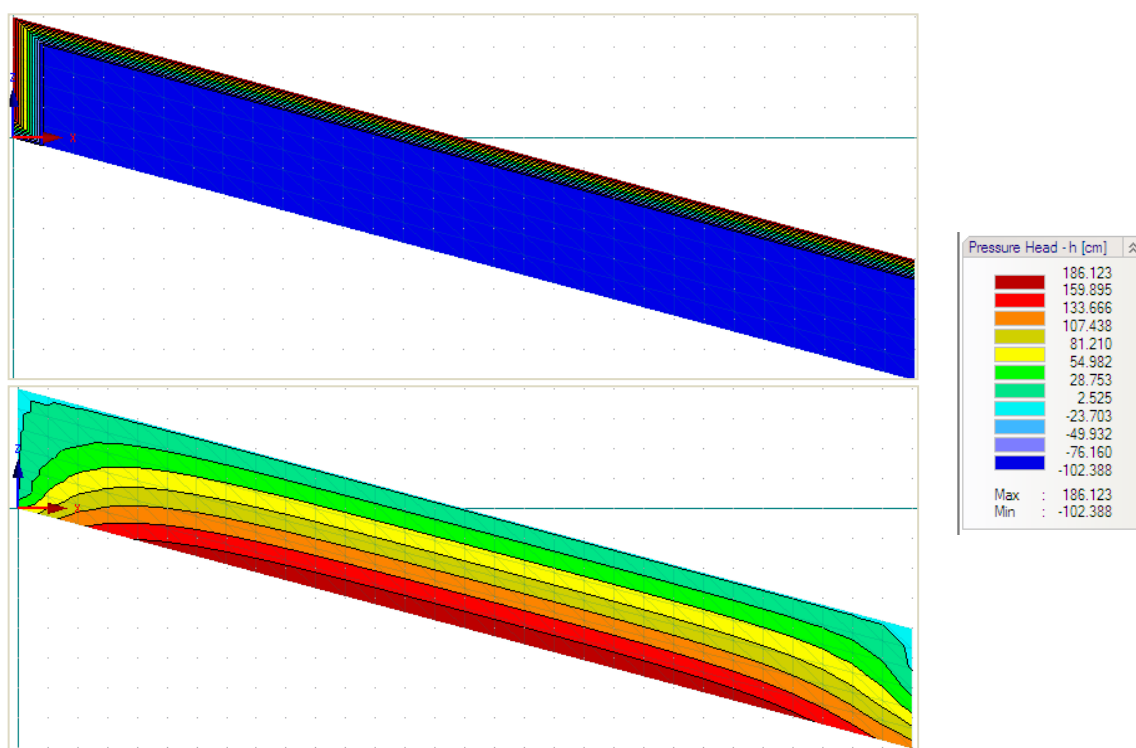


Figura AM 3. Cabezas de presión, espesor de 2,0 m, igual para las 12 texturas de suelo.

Superior. Distribución inicial. **Inferior.** Distribución final.

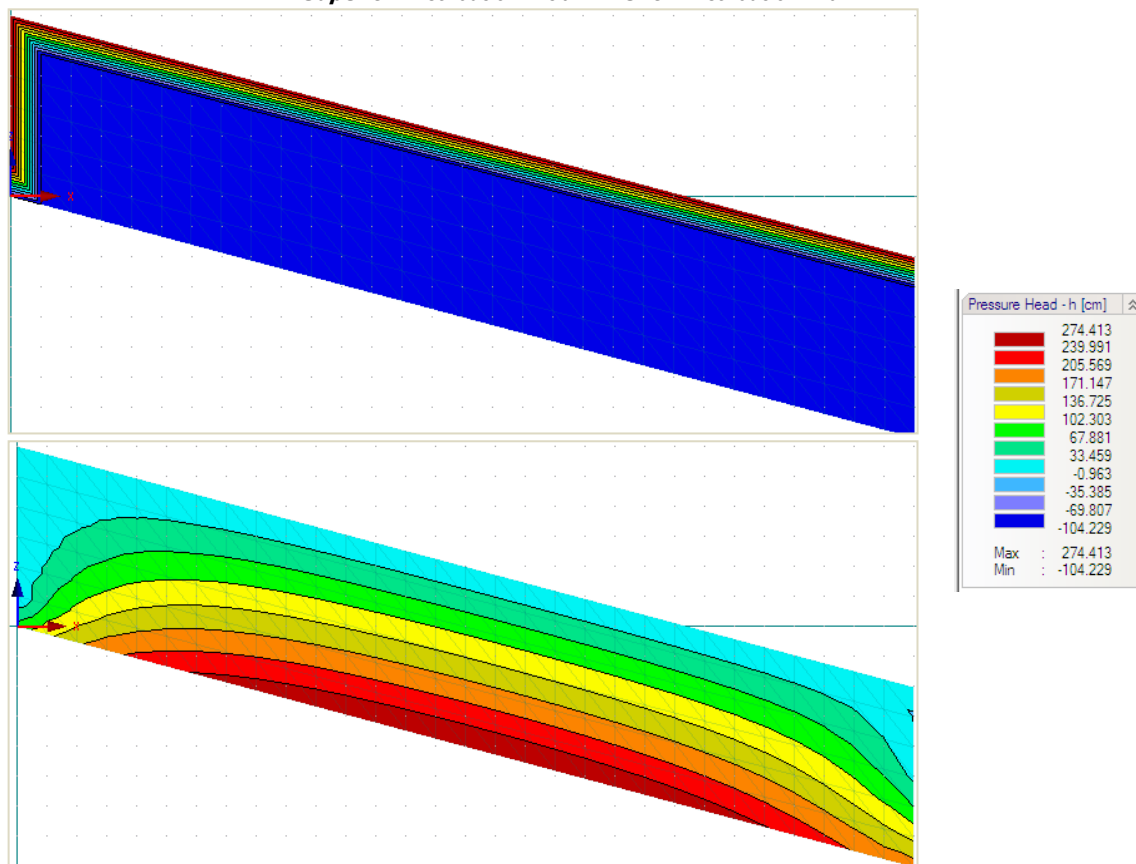


Figura AM 4. Cabezas de presión, espesor de 2,0 m, igual para las 12 texturas de suelo.

Superior. Distribución inicial. **Inferior.** Distribución final.

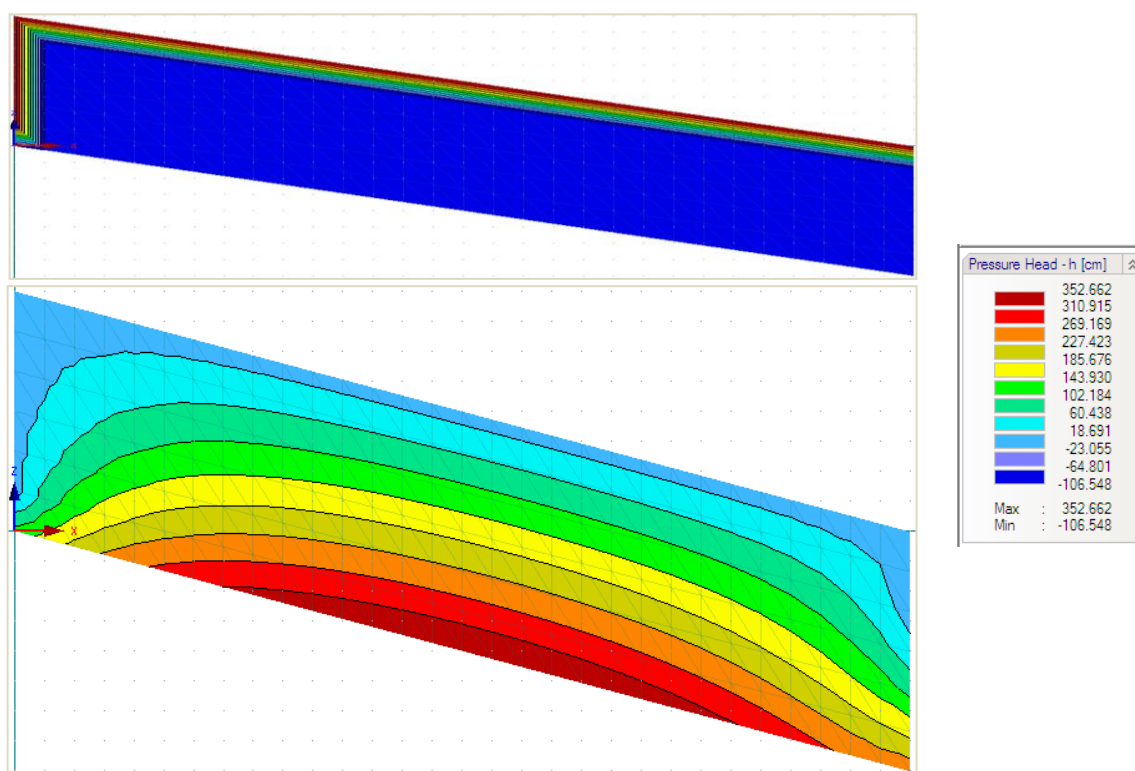


Figura AM 5. Cabezas de presión, espesor de 2,0 m, igual para las 12 texturas de suelo.

Superior: Distribución inicial. **Inferior:** Distribución final.

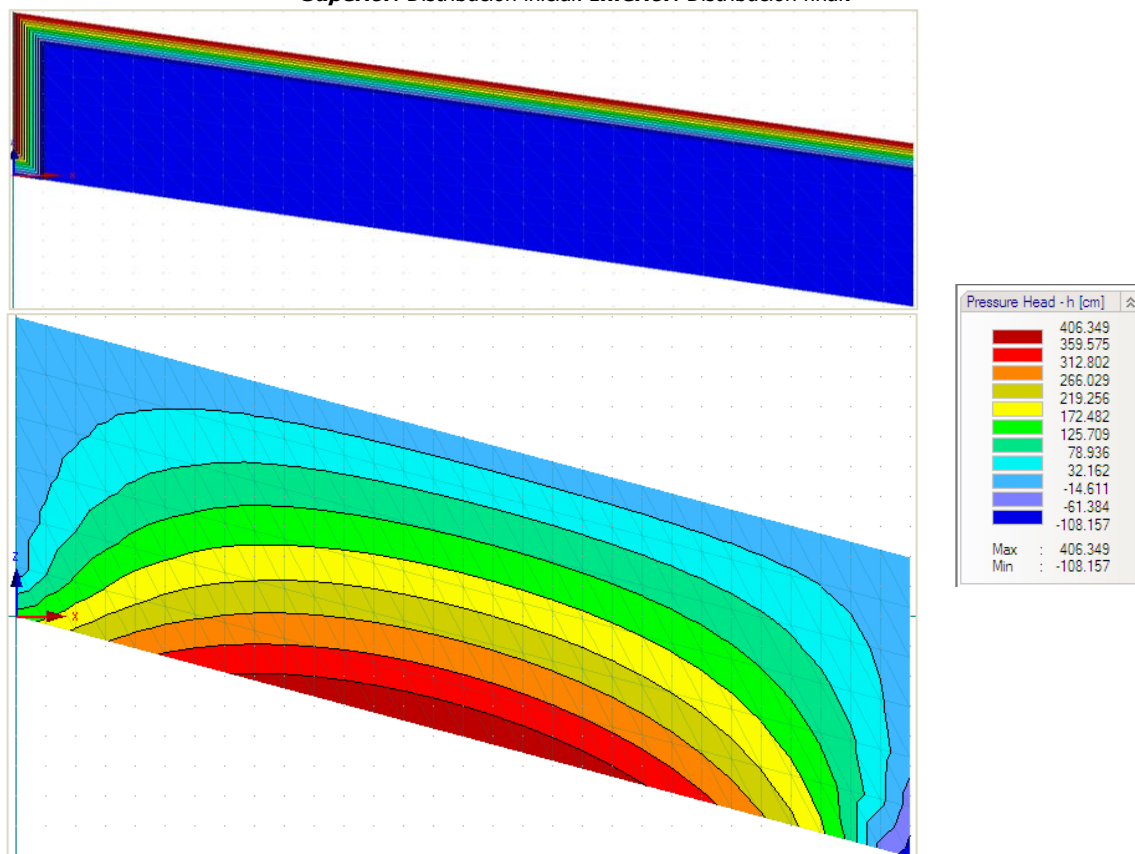


Figura AM 6. Cabezas de presión, espesor de 2,0 m, igual para las 12 texturas de suelo.

Superior: Distribución inicial. **Inferior:** Distribución final.

De cada una de las 6 figuras anteriores se desprenden las siguientes, sumando 72 modelaciones:

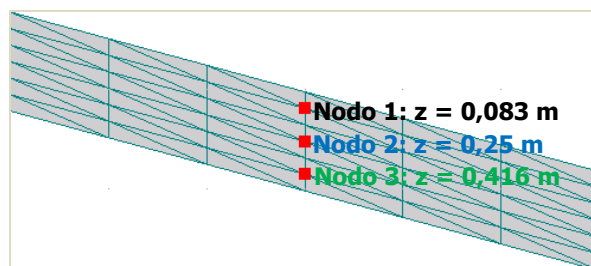


Figura AM 7. Ubicación de los 3 nodos de control en el centro del suelo, espesor de suelo: **0,5 m**.

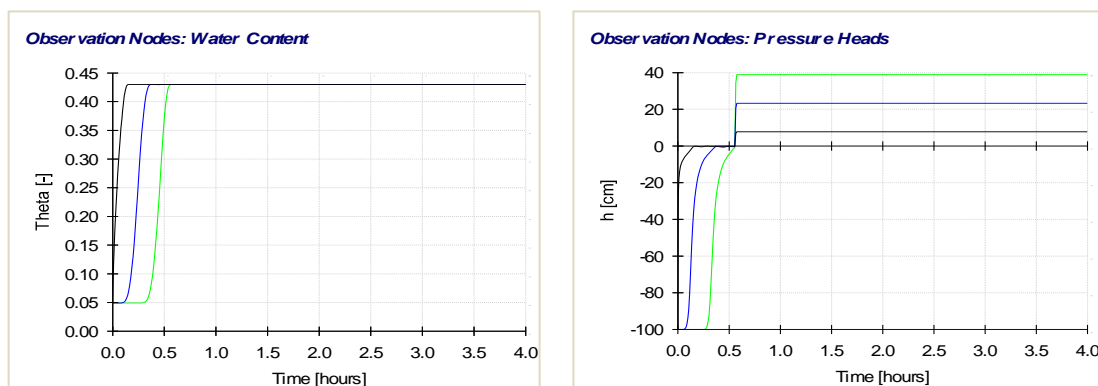


Figura AM 8. Valores para un espesor de **0,5 m**, en un suelo de textura: **Arena**.

Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

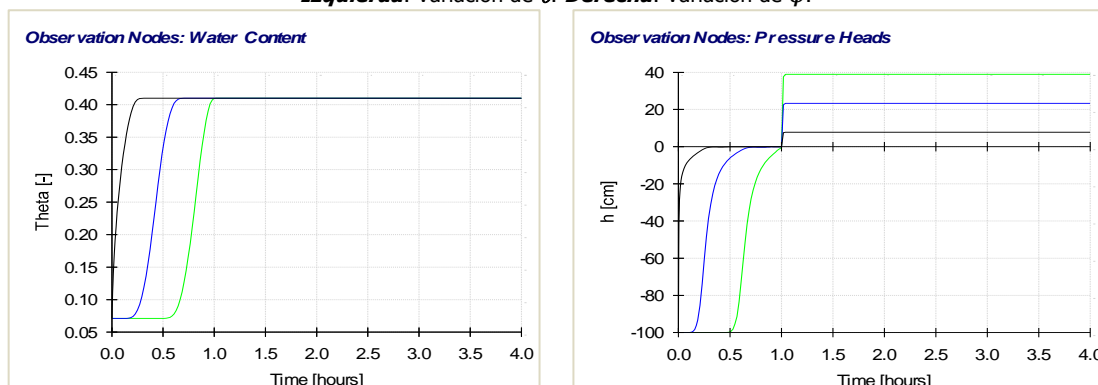


Figura AM 9. Valores para un espesor de **0,5 m**, en un suelo de textura: **Arenoso**.

Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

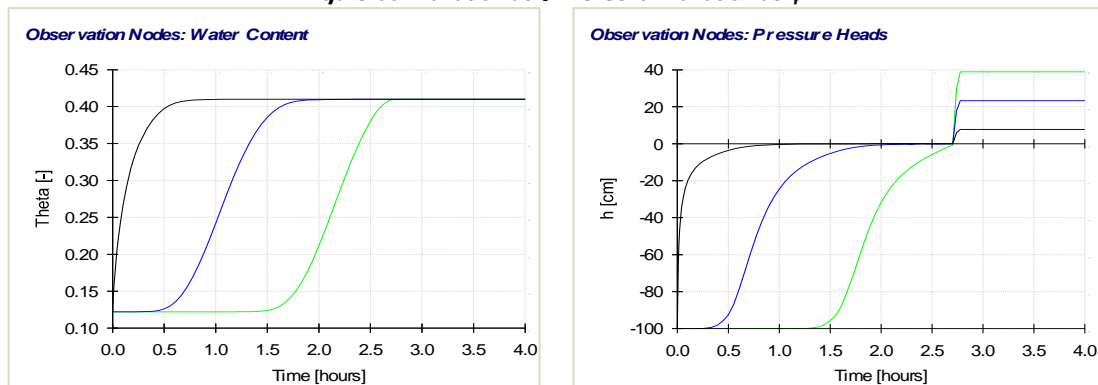


Figura AM 10. Valores para un espesor de **0,5 m**, en un suelo de textura: **Franco Arenoso**.

Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

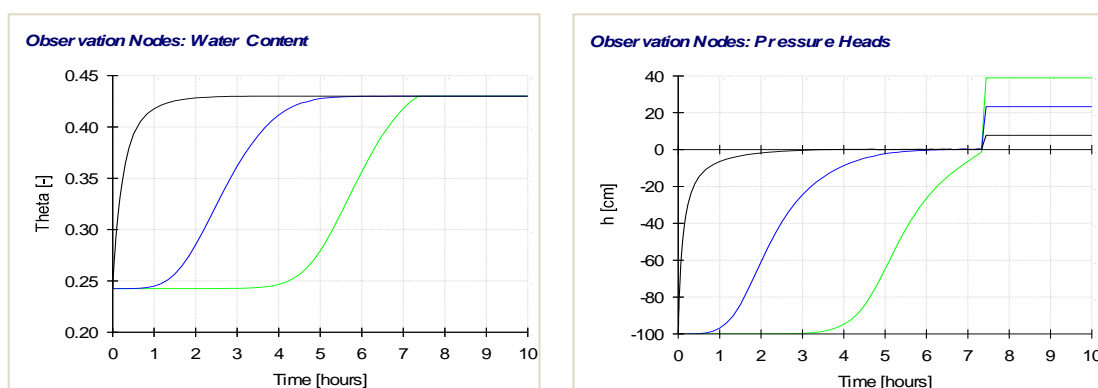


Figura AM 11. Valores para un espesor de **0,5 m**, en un suelo de textura: **Franco**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

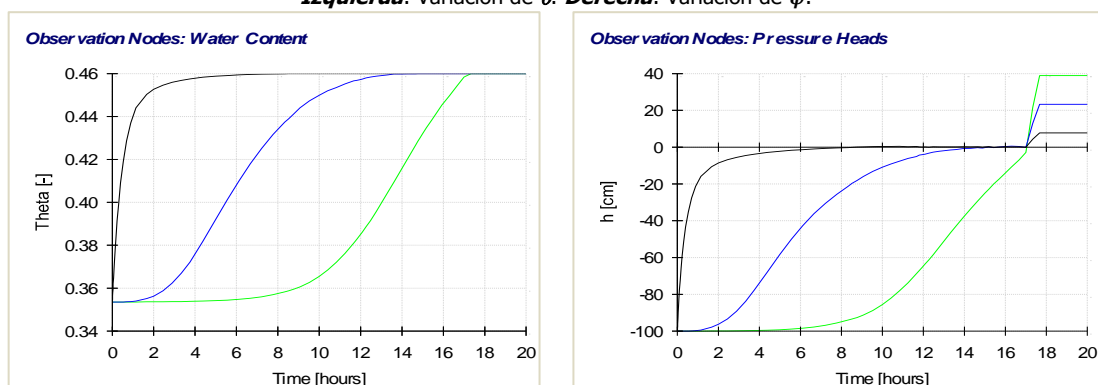


Figura AM 12. Valores para un espesor de **0,5 m**, en un suelo de textura: **Limo**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

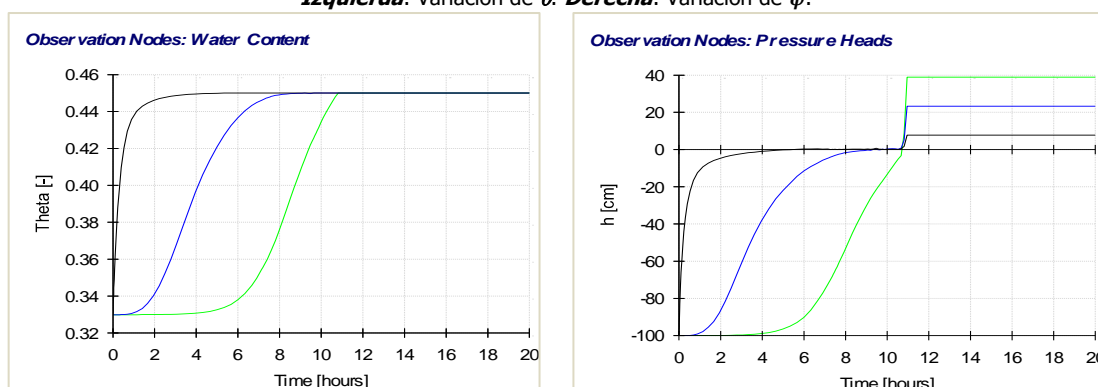


Figura AM 13. Valores para un espesor de **0,5 m**, en un suelo de textura: **Franco Limoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

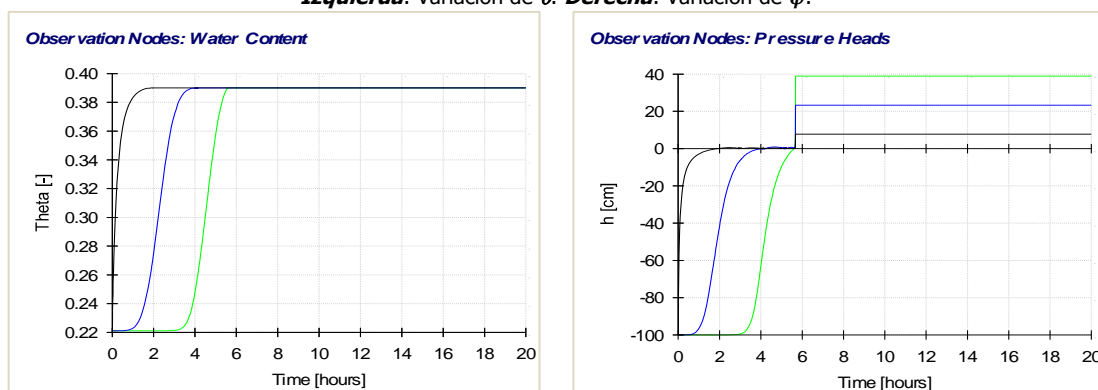


Figura AM 14. Valores para un espesor de **0,5 m**, en un suelo de textura: **Franco Arcillo Arenoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

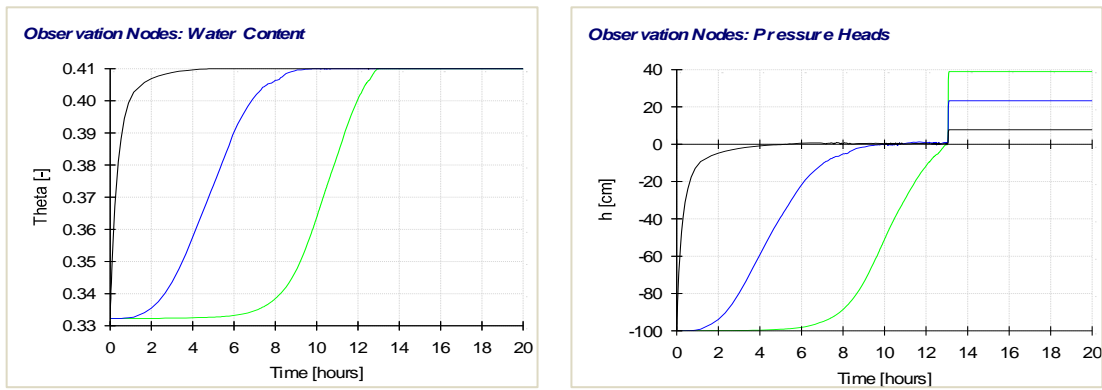


Figura AM 15. Valores para un espesor de **0,5 m**, en un suelo de textura: **Franco Arcilloso**.
Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

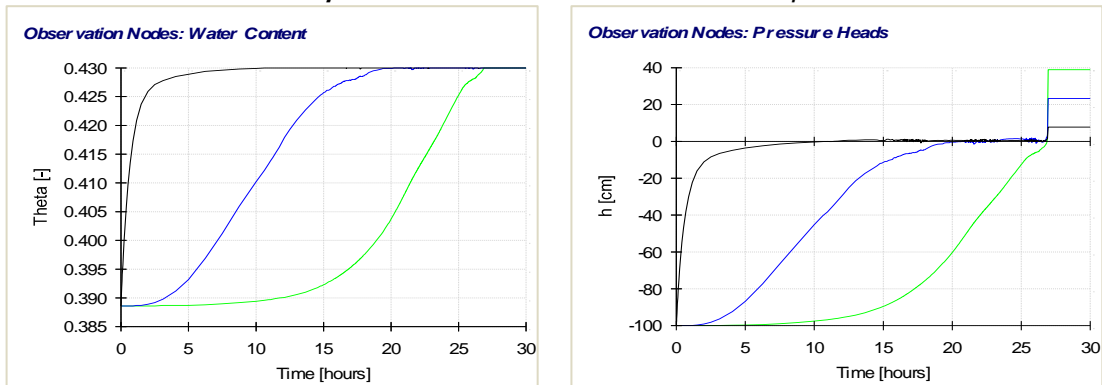


Figura AM 16. Valores para un espesor de **0,5 m**, en un suelo de textura: **Franco Arcillo Limoso**.
Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

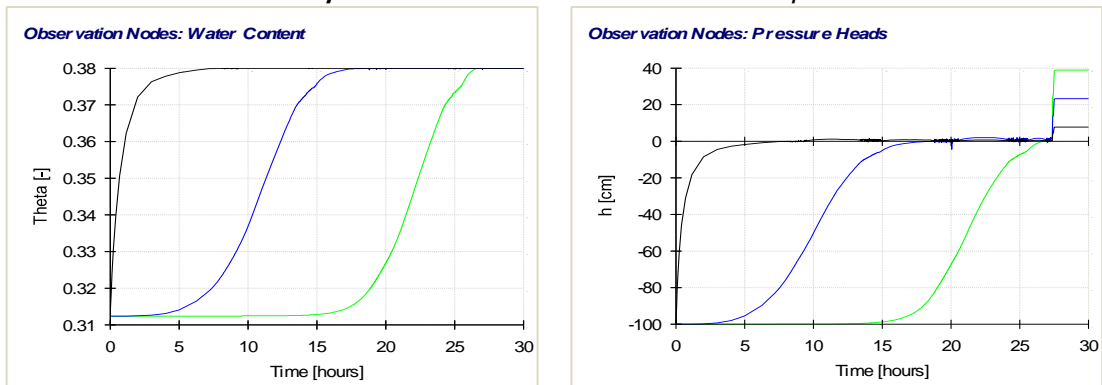


Figura AM 17. Valores para un espesor de **0,5 m**, en un suelo de textura: **Arcillo Arenoso**.
Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

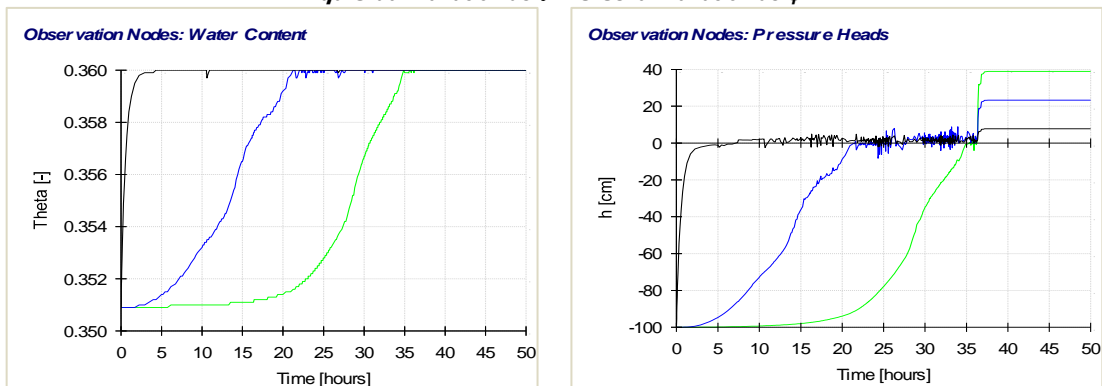


Figura AM 18. Valores para un espesor de **0,5 m**, en un suelo de textura: **Arcillo Limoso**.
Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

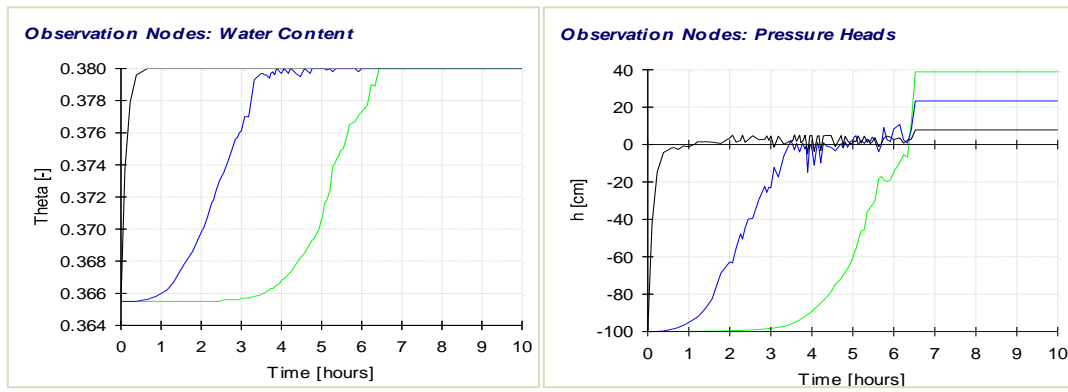


Figura AM 19. Valores para un espesor de **0,5 m**, en un suelo de textura: **Arcilla**.
Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

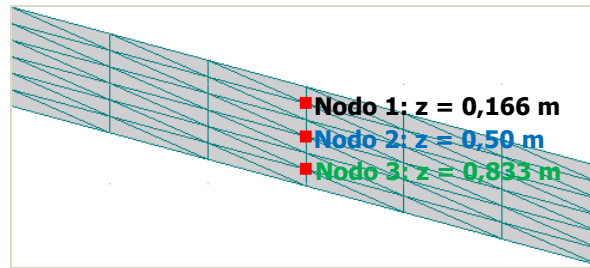


Figura AM 20. Ubicación de los 3 nodos de control en el centro del suelo, espesor de suelo: **1,0 m**.

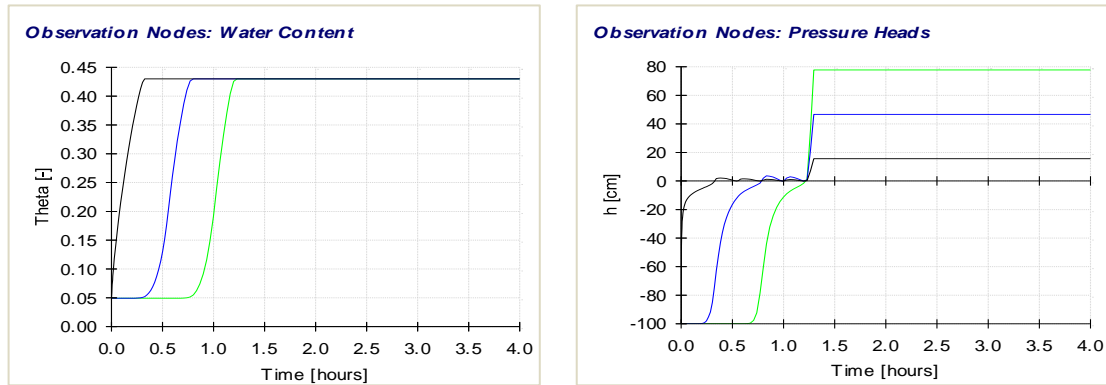


Figura AM 21. Valores para un espesor de **1,0 m**, en un suelo de textura: **Arena**.
Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

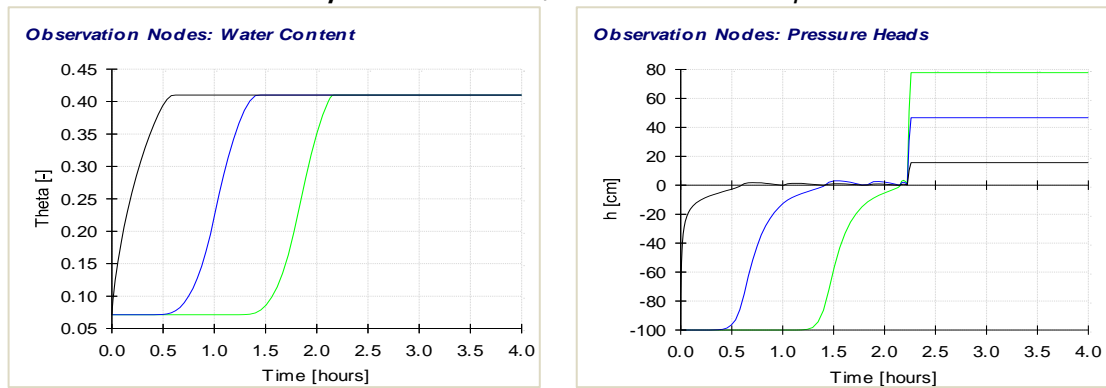


Figura AM 22. Valores para un espesor de **1,0 m**, en un suelo de textura: **Areno francoso**.
Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

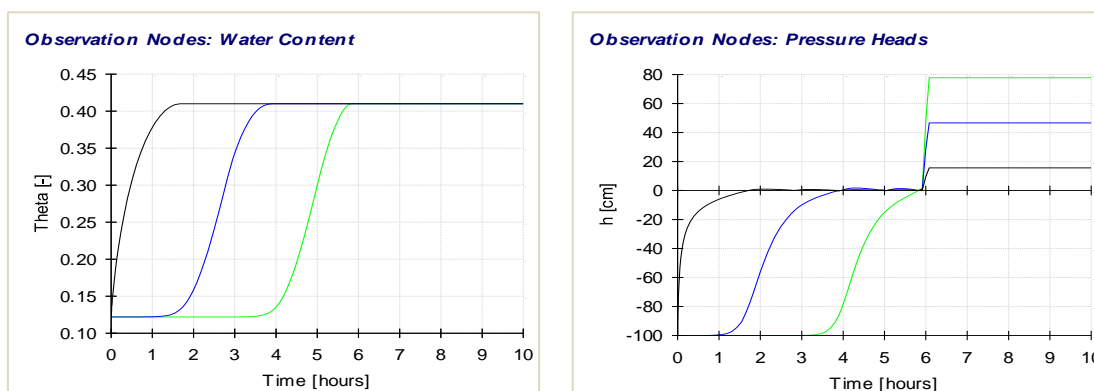


Figura AM 23. Valores para un espesor de **1,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Arenoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

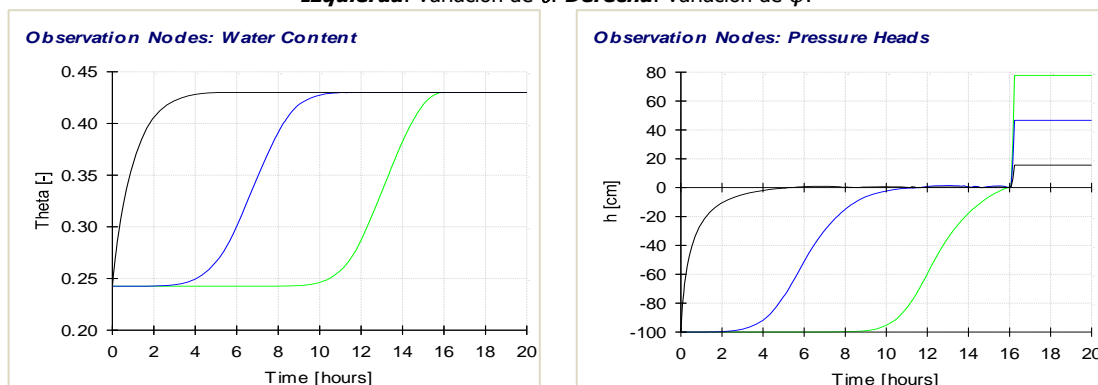


Figura AM 24. Valores para un espesor de **1,0 m**, en un suelo de textura: **Franco**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

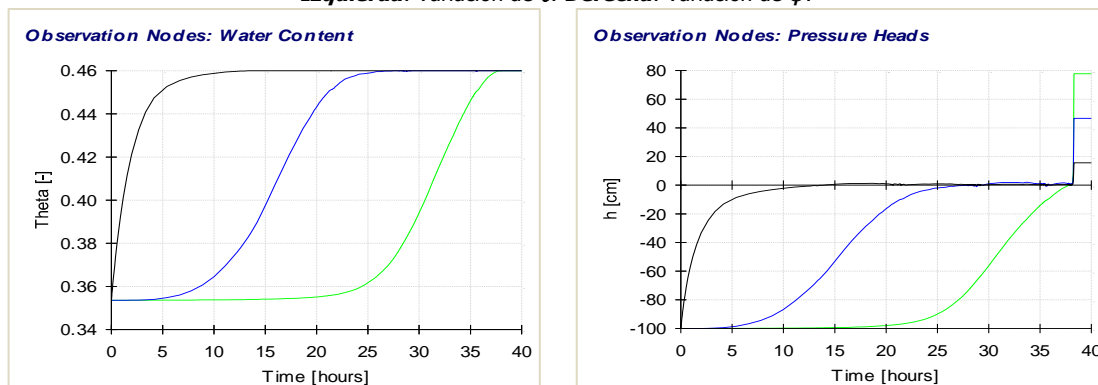


Figura AM 25. Valores para un espesor de **1,0 m**, en un suelo de textura: **Limo**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

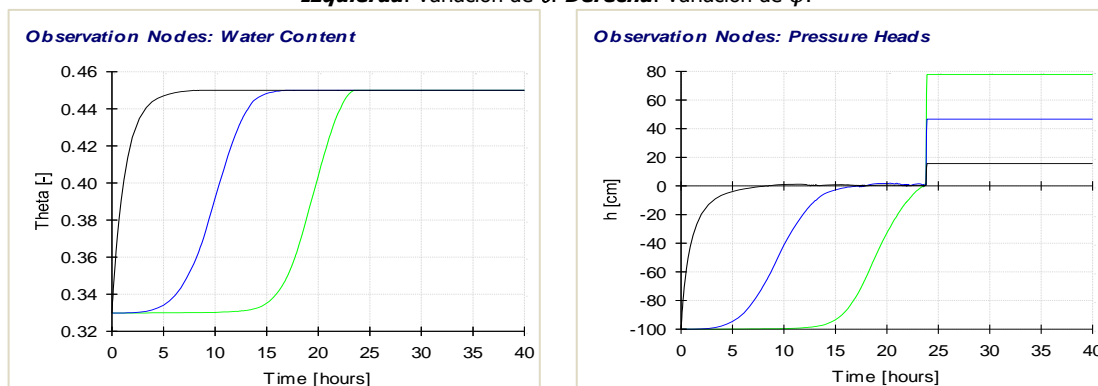


Figura AM 26. Valores para un espesor de **1,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Limoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

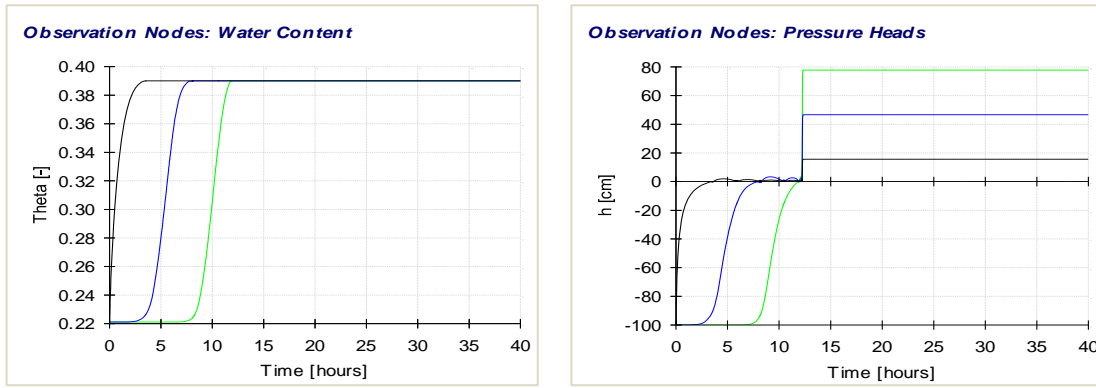


Figura AM 27. Valores para un espesor de **1,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Arcillo Arenoso**.
Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

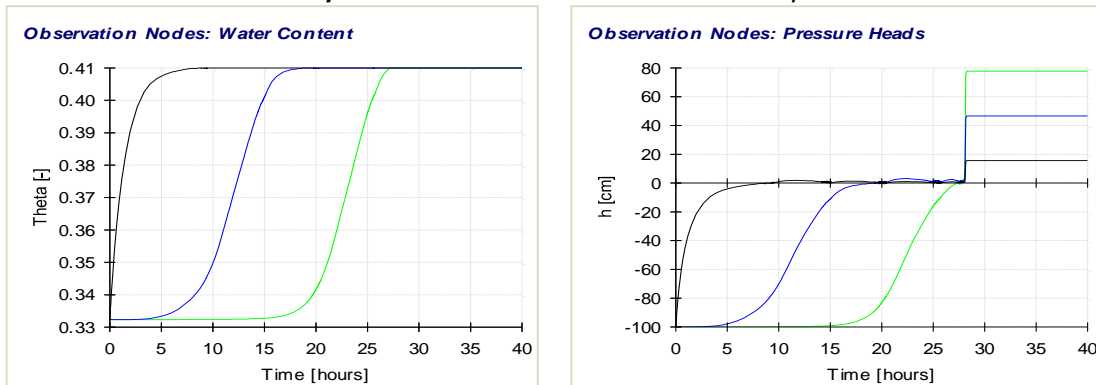


Figura AM 28. Valores para un espesor de **1,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Arcilloso**.
Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

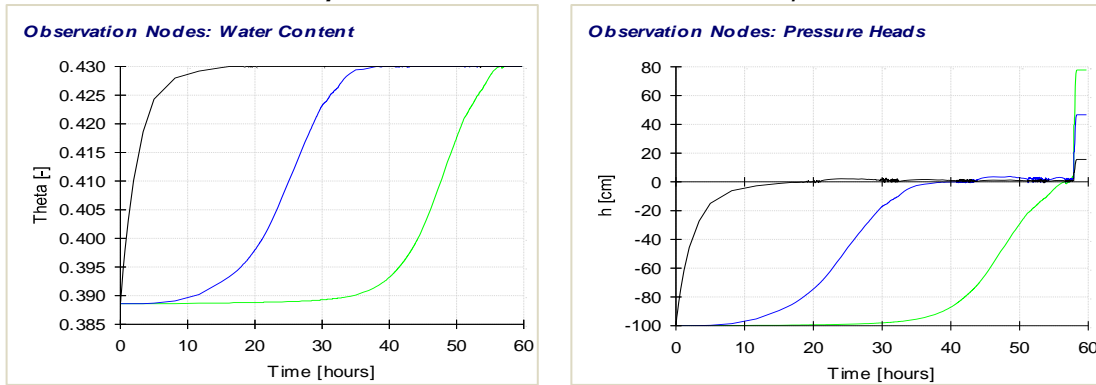


Figura AM 29. Valores para un espesor de **1,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Arcillo Limoso**.
Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

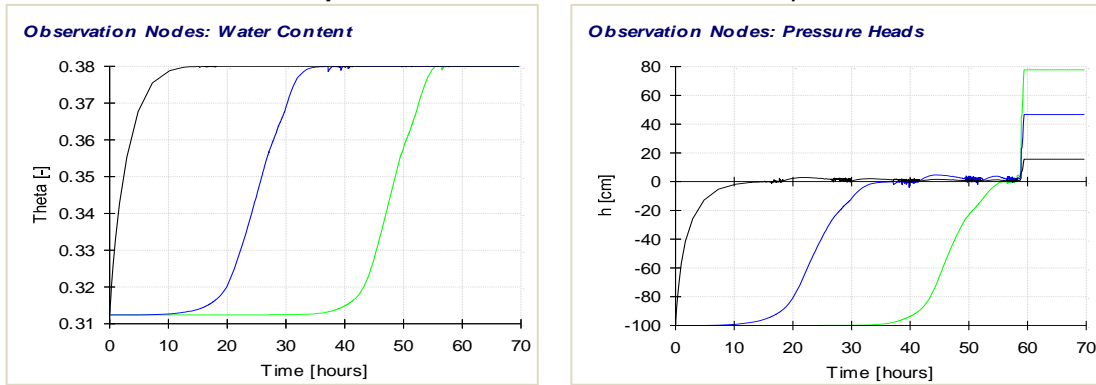


Figura AM 30. Valores para un espesor de **1,0 m**, en un suelo de textura: **Arcillo Arenoso**.
Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

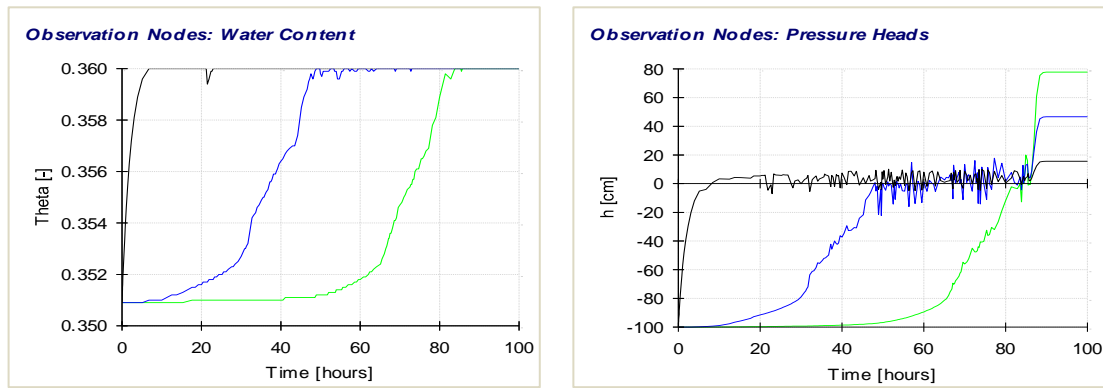


Figura AM 31. Valores para un espesor de **1,0 m**, en un suelo de textura: **Arcillo Limoso**.

Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

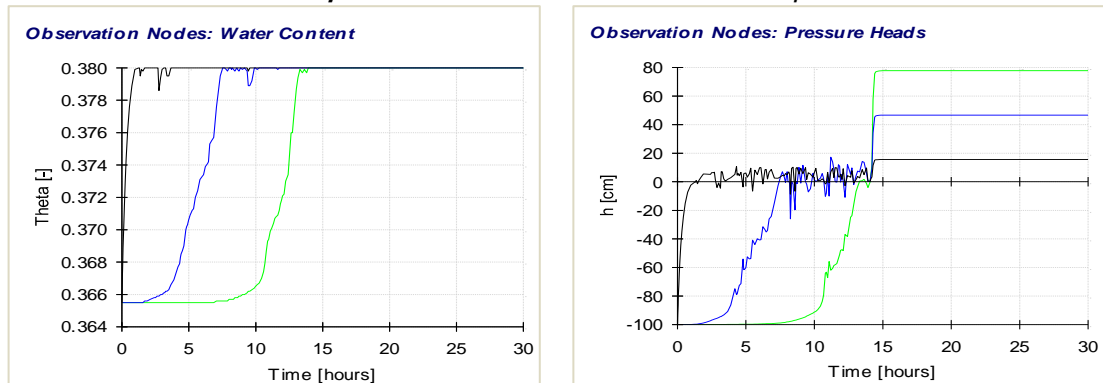


Figura AM 32. Valores para un espesor de **1,0 m**, en un suelo de textura: **Arcilla**.

Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

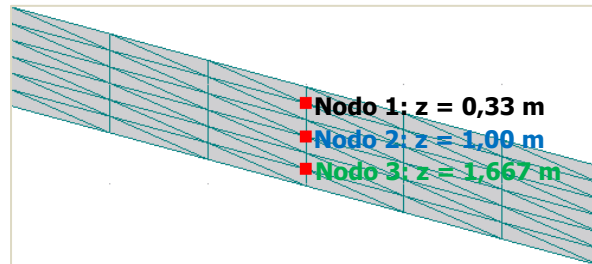


Figura AM 33. Ubicación de los 3 nodos de control en el centro del suelo, espesor de suelo: **2,0 m**.

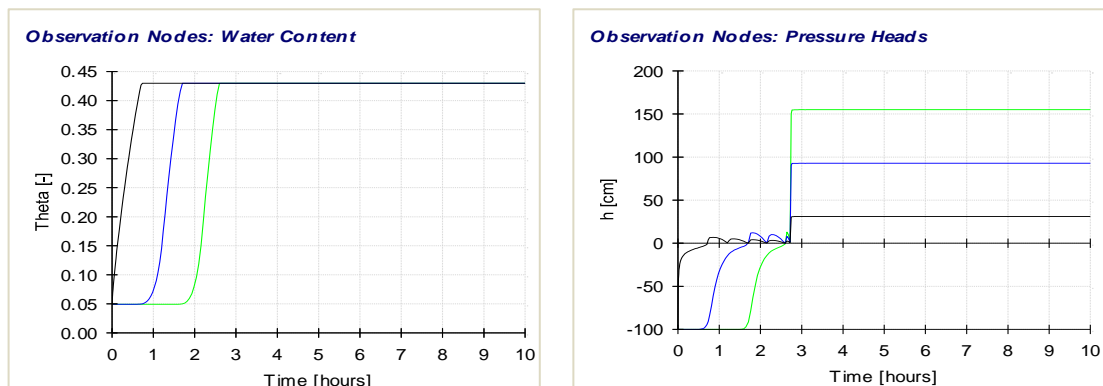


Figura AM 34. Valores para un espesor de **2,0 m**, en un suelo de textura: **Arena**.

Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

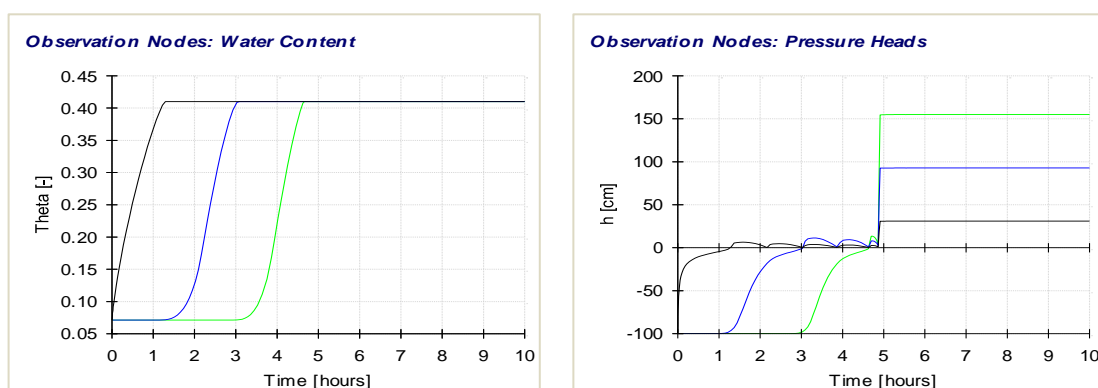


Figura AM 35. Valores para un espesor de **2,0 m**, en un suelo de textura: **Areno francoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

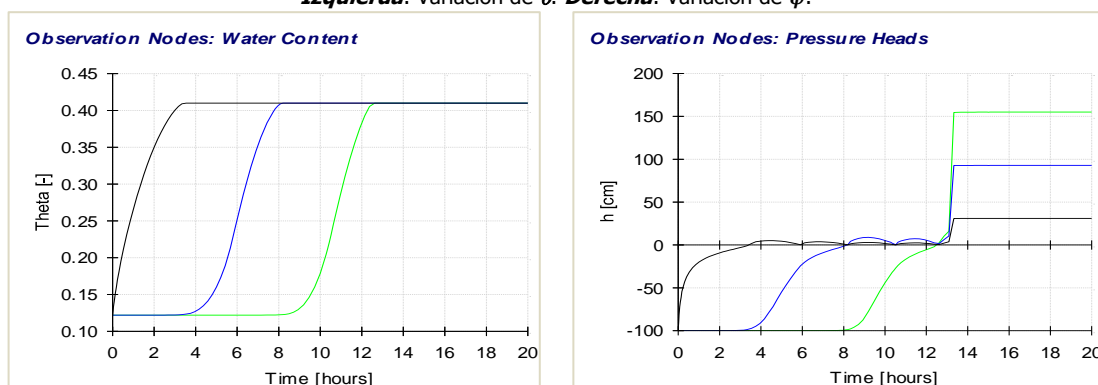


Figura AM 36. Valores para un espesor de **2,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Arenoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

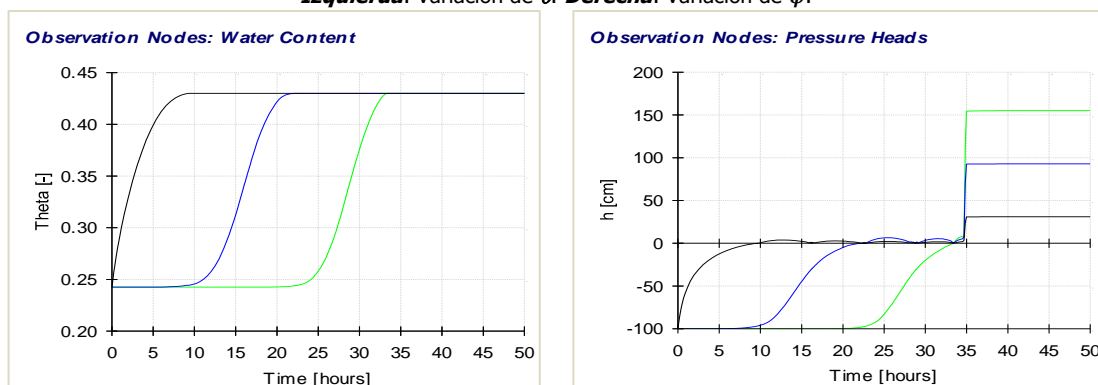


Figura AM 37. Valores para un espesor de **2,0 m**, en un suelo de textura: **Franco**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

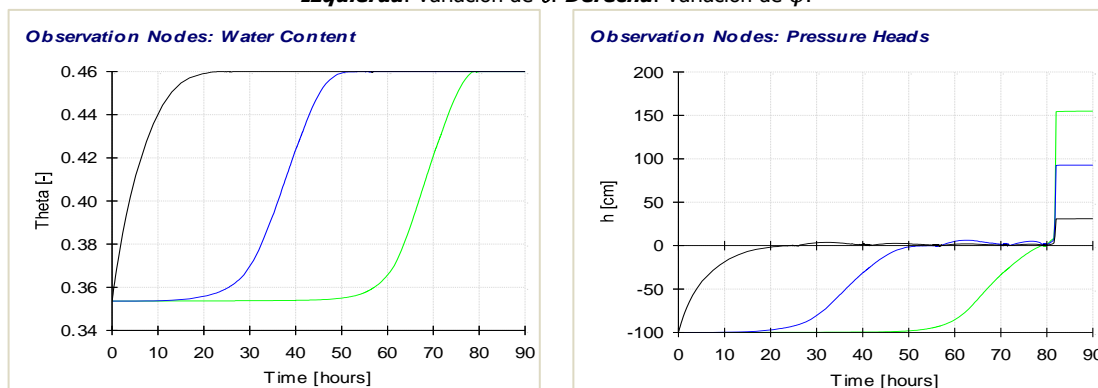


Figura AM 38. Valores para un espesor de **2,0 m**, en un suelo de textura: **Limo**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

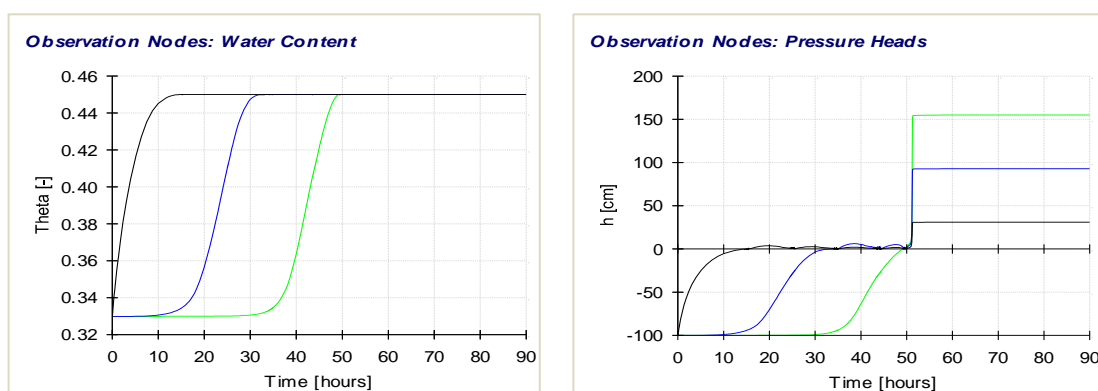


Figura AM 39. Valores para un espesor de 2,0 m, en un suelo de textura: **Franco Limoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

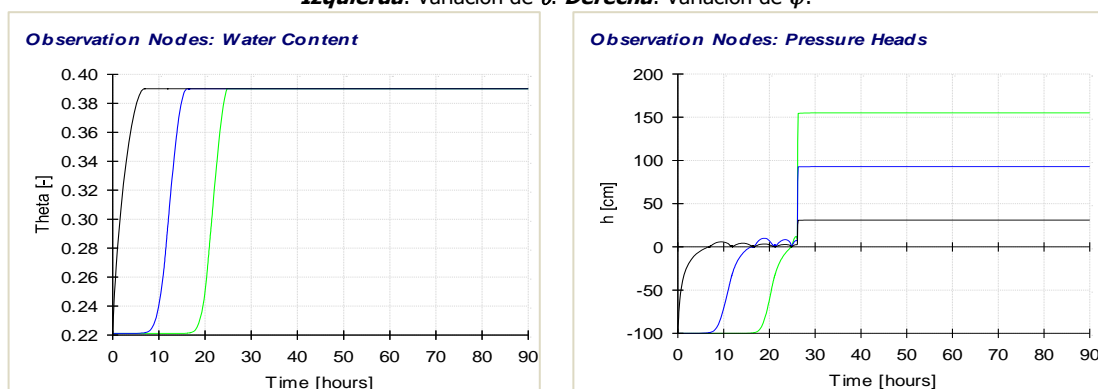


Figura AM 40. Valores para un espesor de 2,0 m, en un suelo de textura: **Franco Arcillo Arenoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

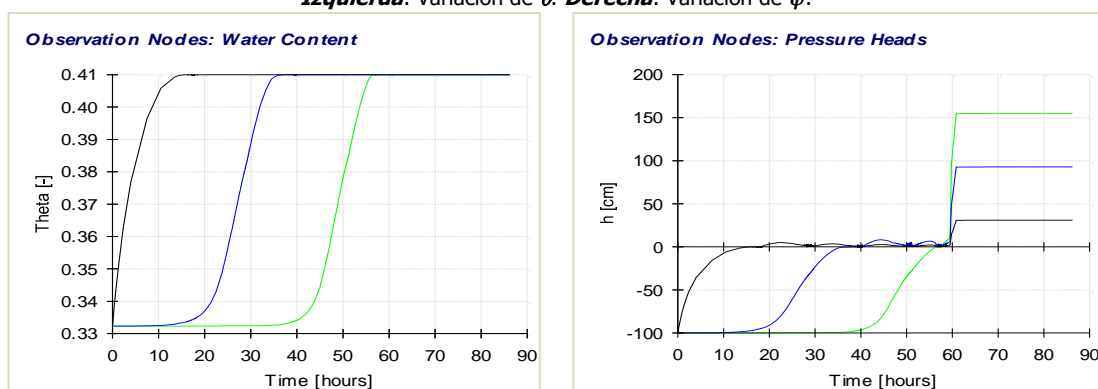


Figura AM 41. Valores para un espesor de 2,0 m, en un suelo de textura: **Franco Arcilloso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

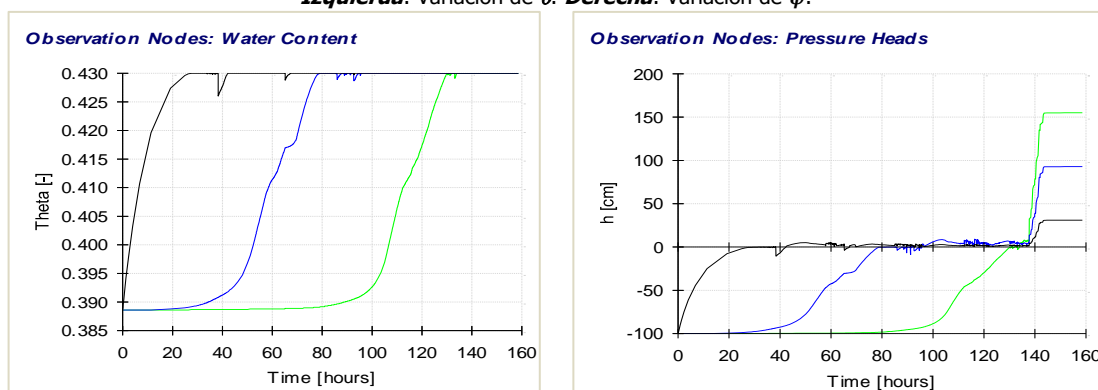


Figura AM 42. Valores para un espesor de 2,0 m, en un suelo de textura: **Franco Arcillo Limoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

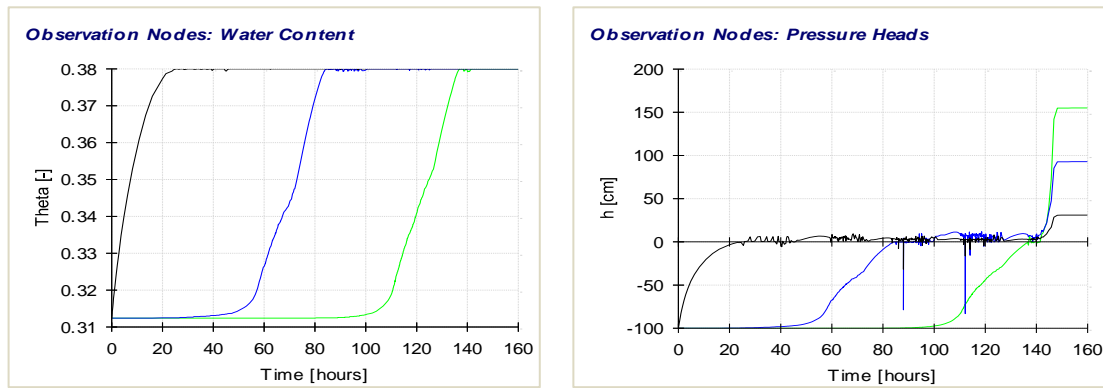


Figura AM 43. Valores para un espesor de **2,0 m**, en un suelo de textura: **Arcillo Arenoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

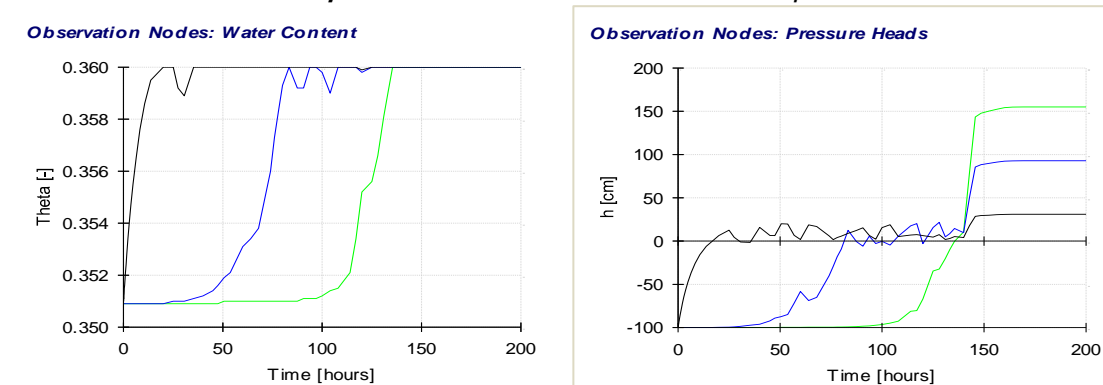


Figura AM 44. Valores para un espesor de **2,0 m**, en un suelo de textura: **Arcillo Limoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

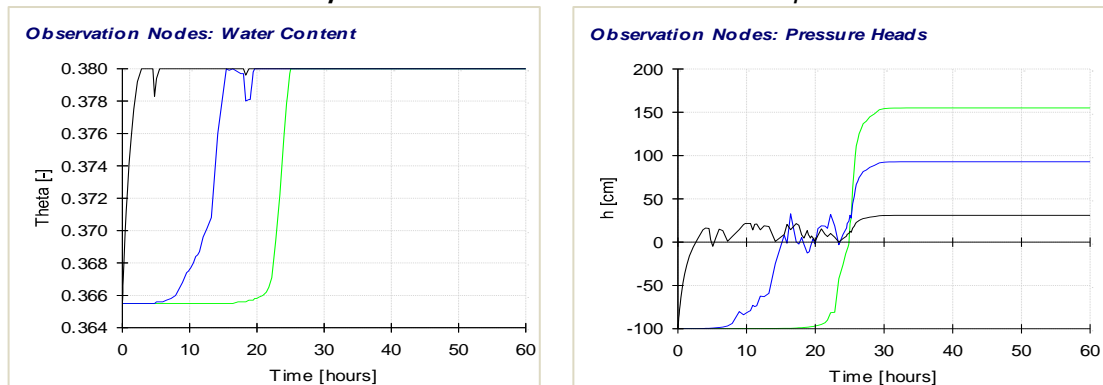


Figura AM 45. Valores para un espesor de **2,0 m**, en un suelo de textura: **Arcilla**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

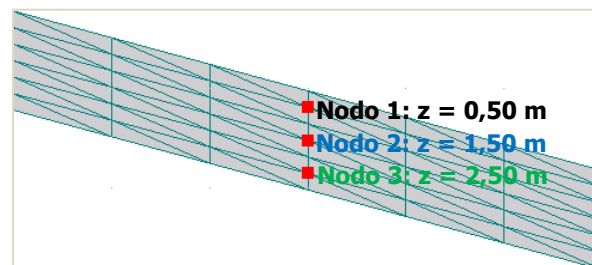


Figura AM 46. Ubicación de los 3 nodos de control en el centro del suelo, espesor de suelo: **3,0 m**.

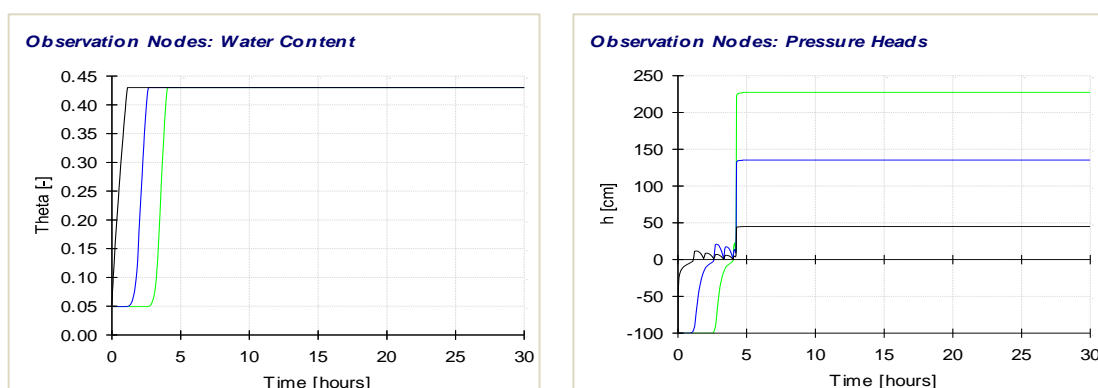


Figura AM 47. Valores para un espesor de **3,0 m**, en un suelo de textura: **Arena**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

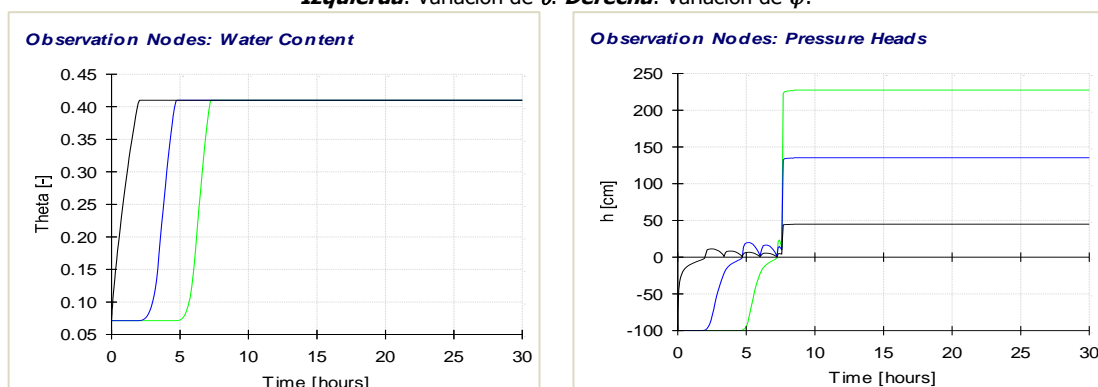


Figura AM 48. Valores para un espesor de **3,0 m**, en un suelo de textura: **Areno francoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

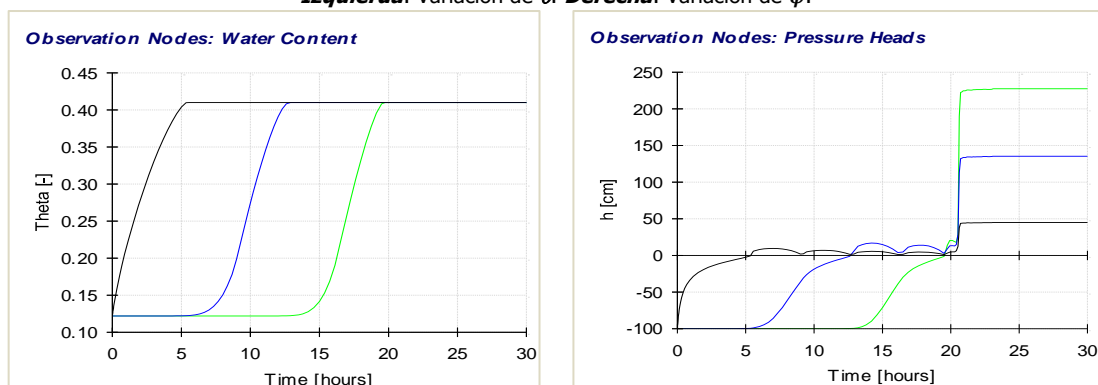


Figura AM 49. Valores para un espesor de **3,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Arenoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

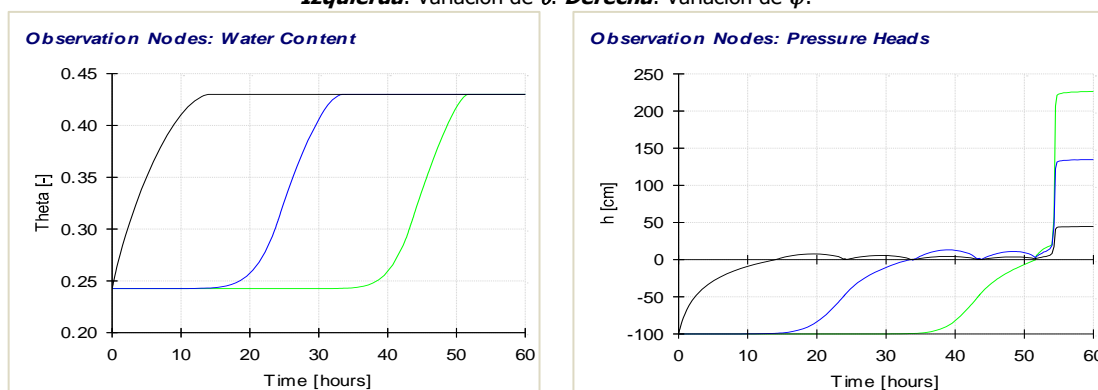


Figura AM 50. Valores para un espesor de **3,0 m**, en un suelo de textura: **Franco**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

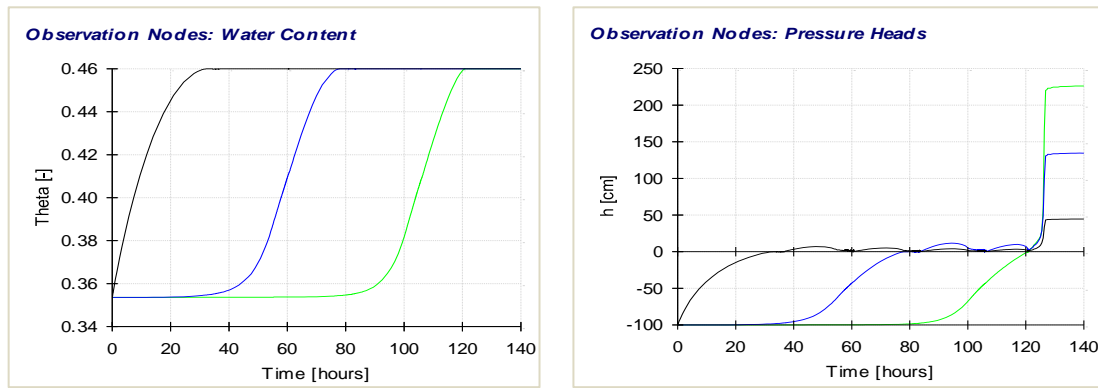


Figura AM 51. Valores para un espesor de **3,0 m**, en un suelo de textura: **Limo**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

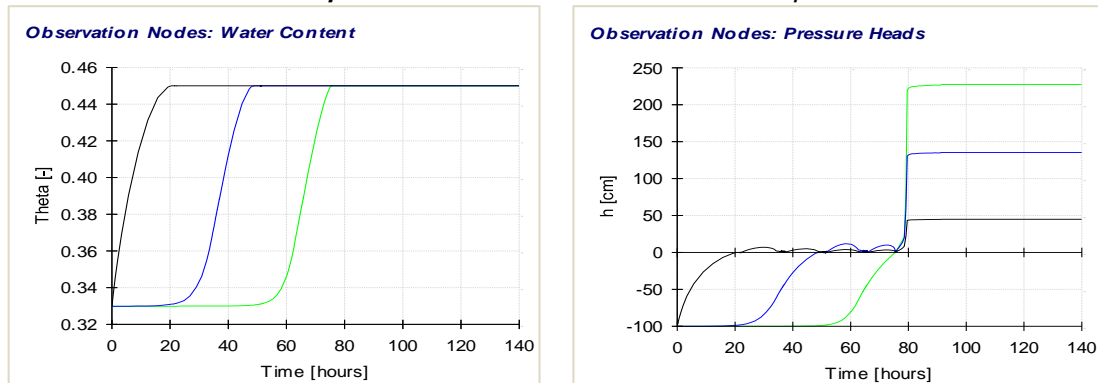


Figura AM 52. Valores para un espesor de **3,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Limoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

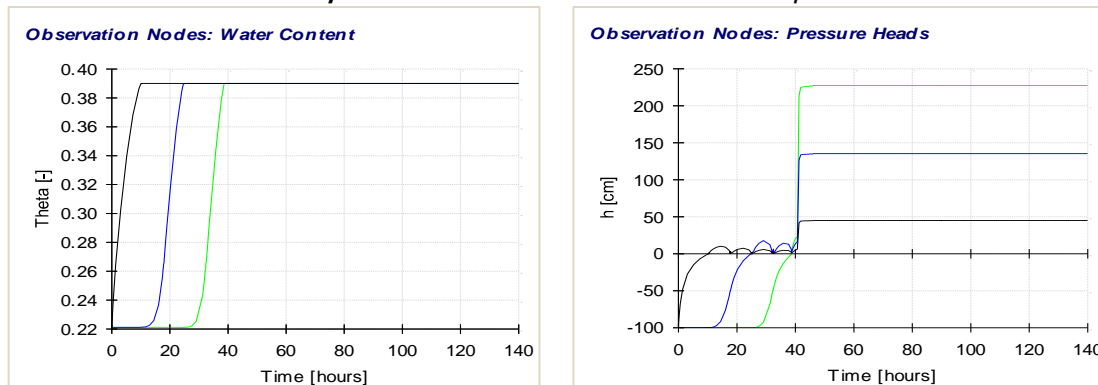


Figura AM 53. Valores para un espesor de **3,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Arcillo Arenoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

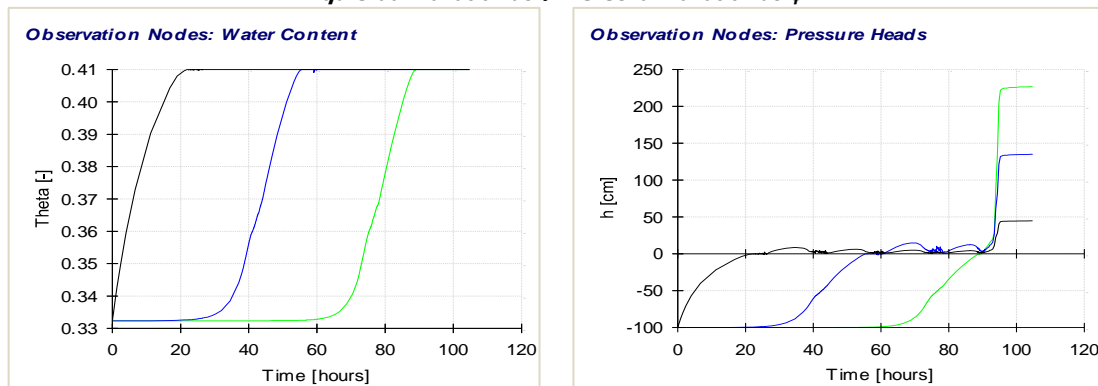


Figura AM 54. Valores para un espesor de **3,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Arcilloso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

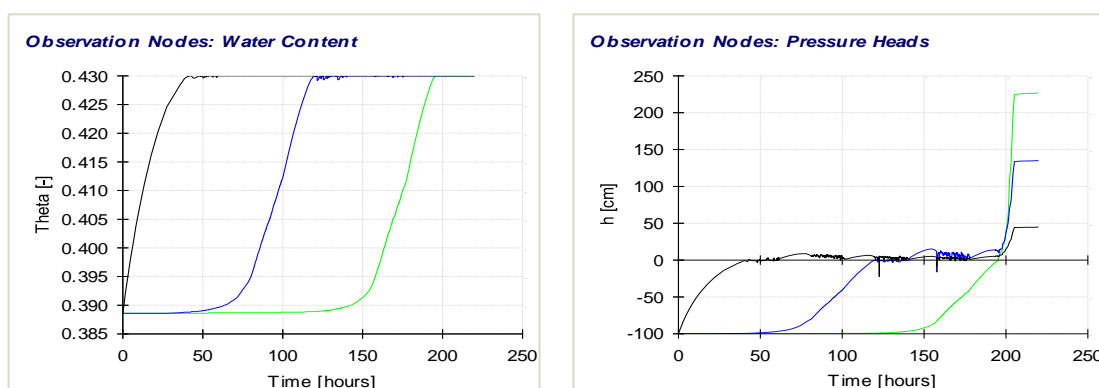


Figura AM 55. Valores para un espesor de **3,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Arcillo Limoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

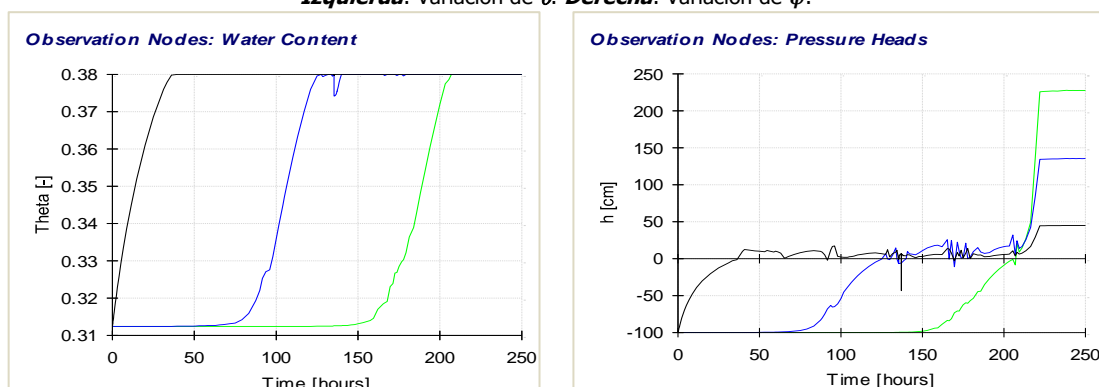


Figura AM 56. Valores para un espesor de **3,0 m**, en un suelo de textura: **Arcillo Arenoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

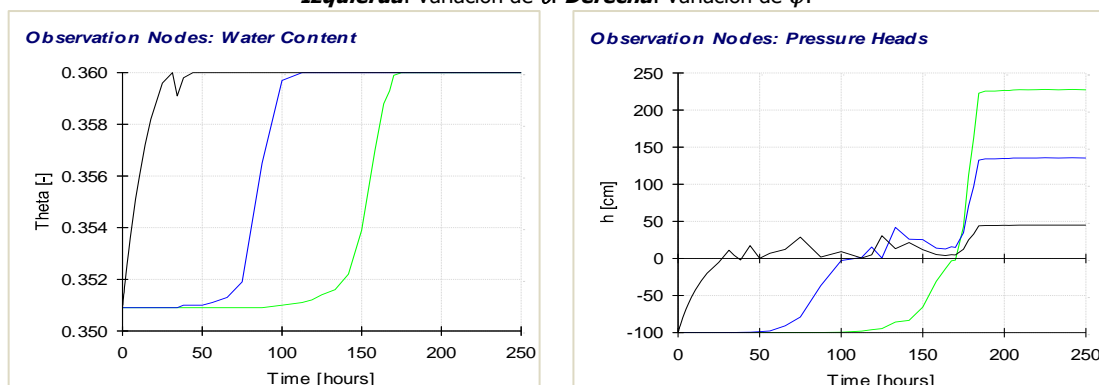


Figura AM 57. Valores para un espesor de **3,0 m**, en un suelo de textura: **Arcillo Limoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

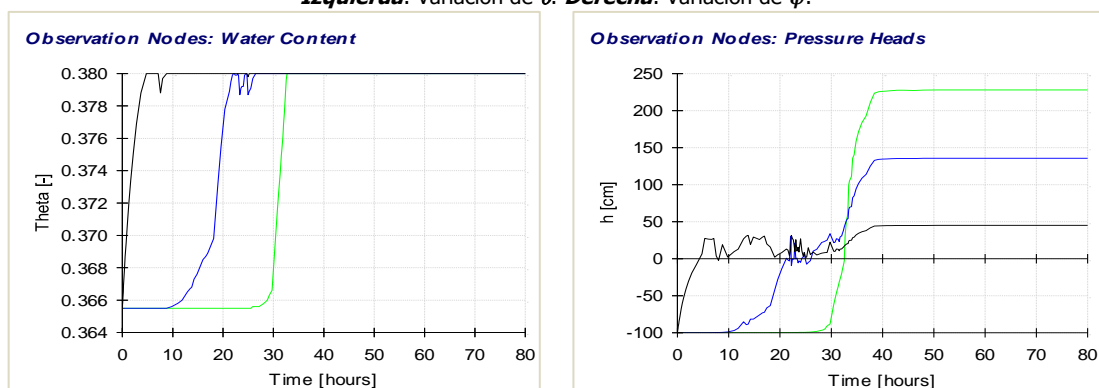


Figura AM 58. Valores para un espesor de **3,0 m**, en un suelo de textura: **Arcilla**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

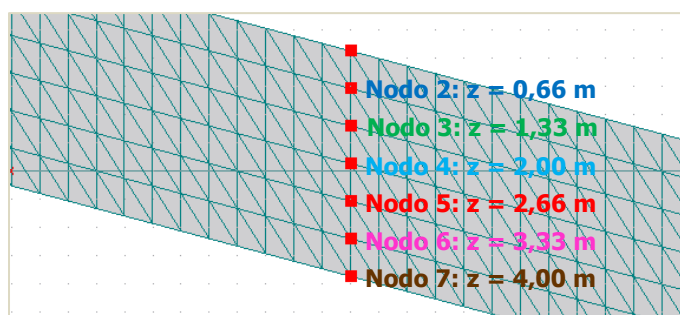


Figura AM 59. Ubicación de los 6 nodos de control en el centro del suelo, espesor de suelo: 4,0 m.

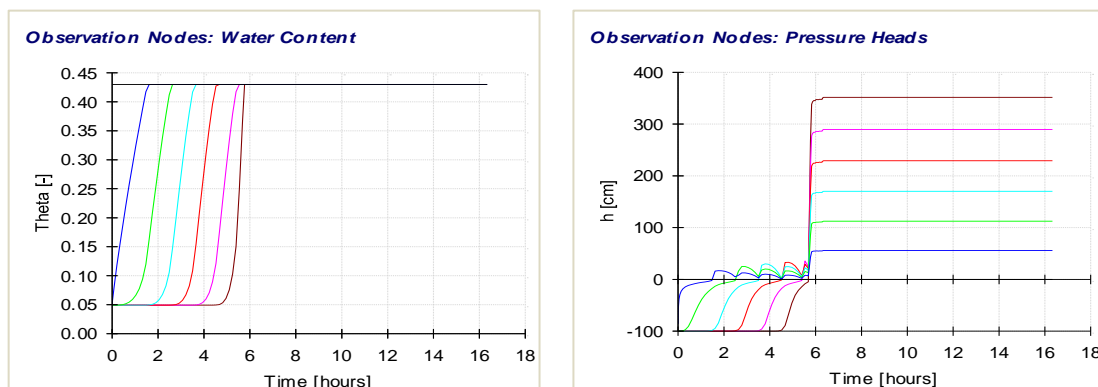


Figura AM 60. Valores para un espesor de 4,0 m, en un suelo de textura: **Arena**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

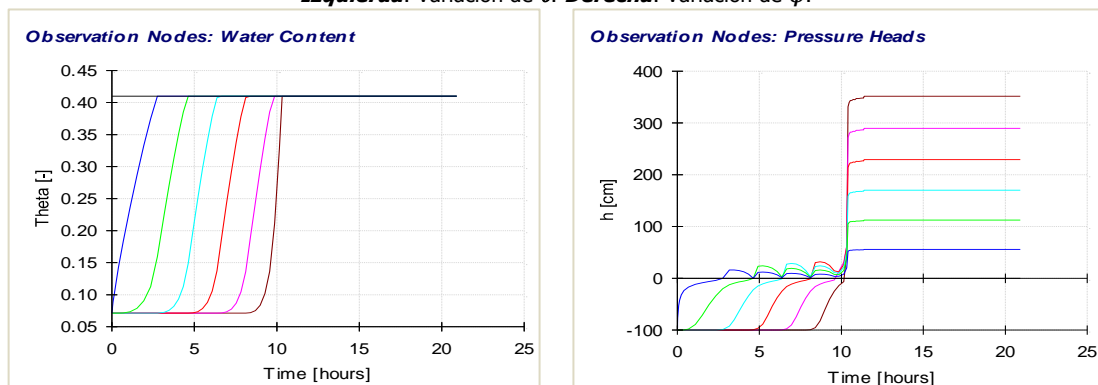


Figura AM 61. Valores para un espesor de 4,0 m, en un suelo de textura: **Arena francosa**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

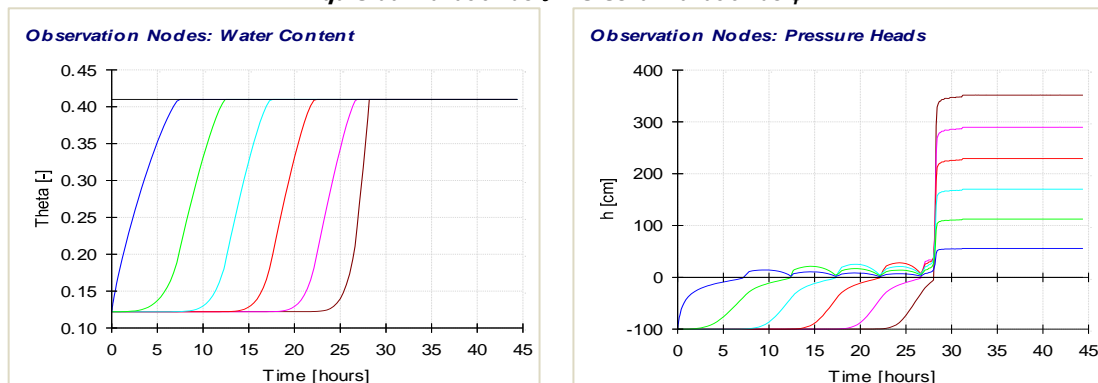


Figura AM 62. Valores para un espesor de 4,0 m, en un suelo de textura: **Franco Arenoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

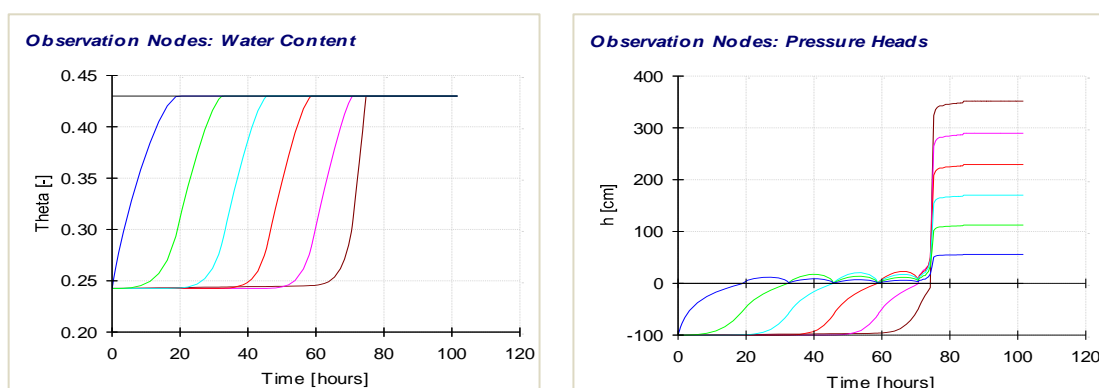


Figura AM 63. Valores para un espesor de **4,0 m**, en un suelo de textura: **Franco**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

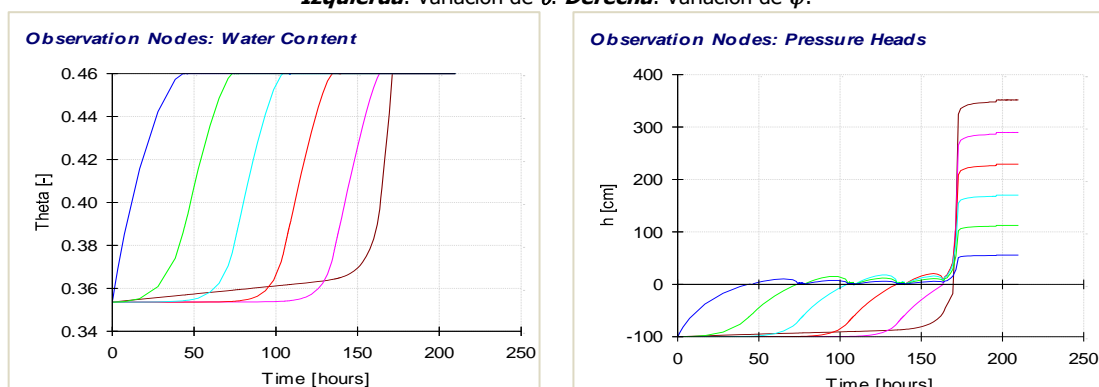


Figura AM 64. Valores para un espesor de **4,0 m**, en un suelo de textura: **Limo**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

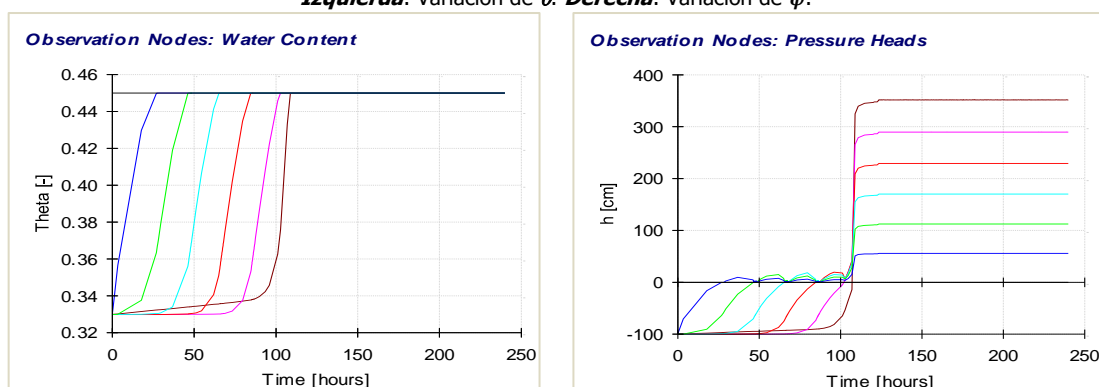


Figura AM 65. Valores para un espesor de **4,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Limoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

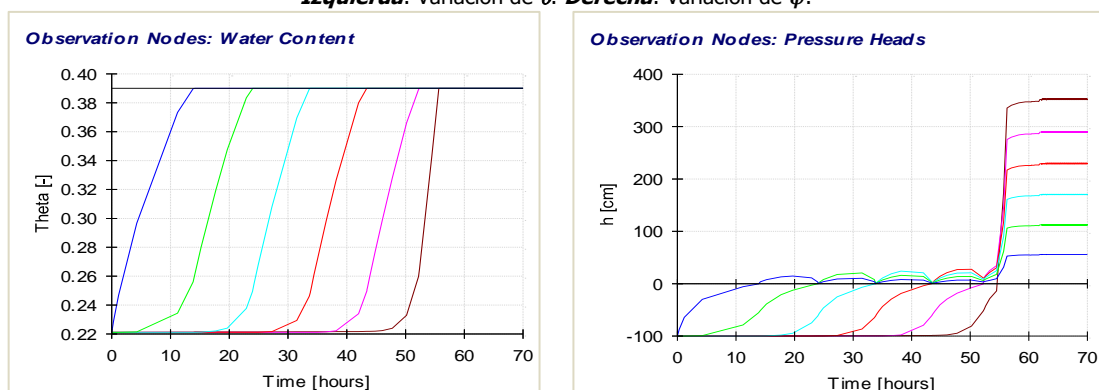


Figura AM 66. Valores para un espesor de **4,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Arcillo Arenoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

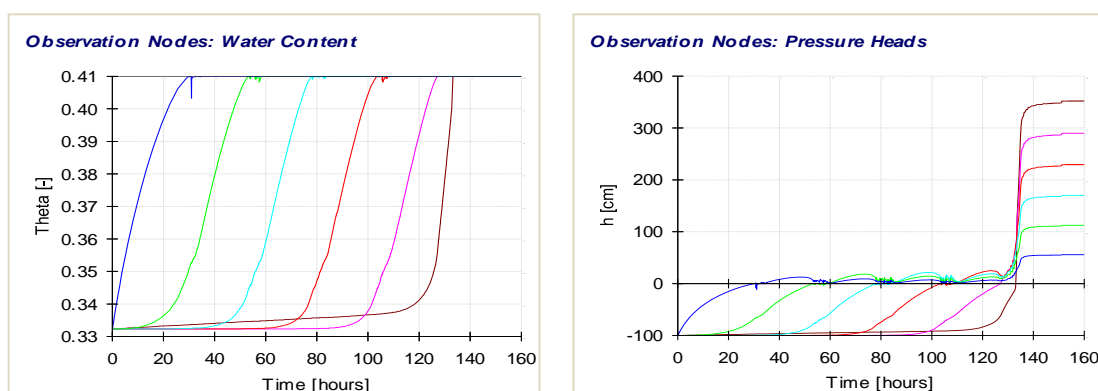


Figura AM 67. Valores para un espesor de **4,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Arcilloso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

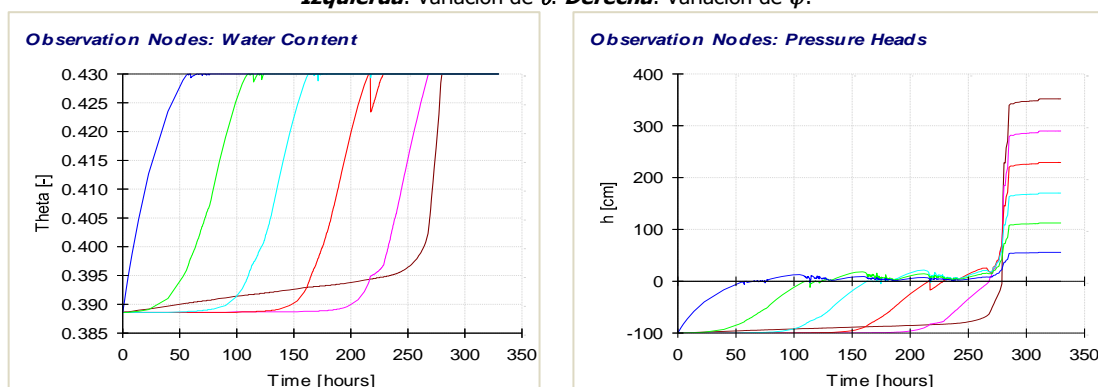


Figura AM 68. Valores para un espesor de **4,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Arcillo Limoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

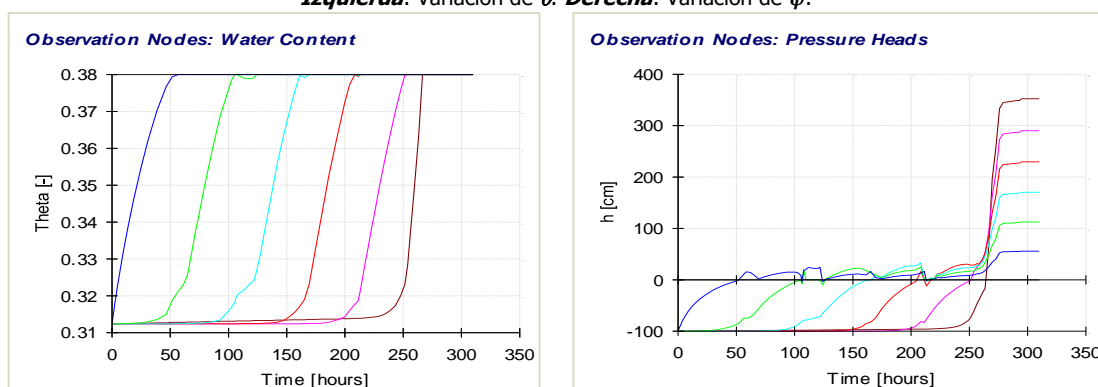


Figura AM 69. Valores para un espesor de **4,0 m**, en un suelo de textura: **Arcillo Arenoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

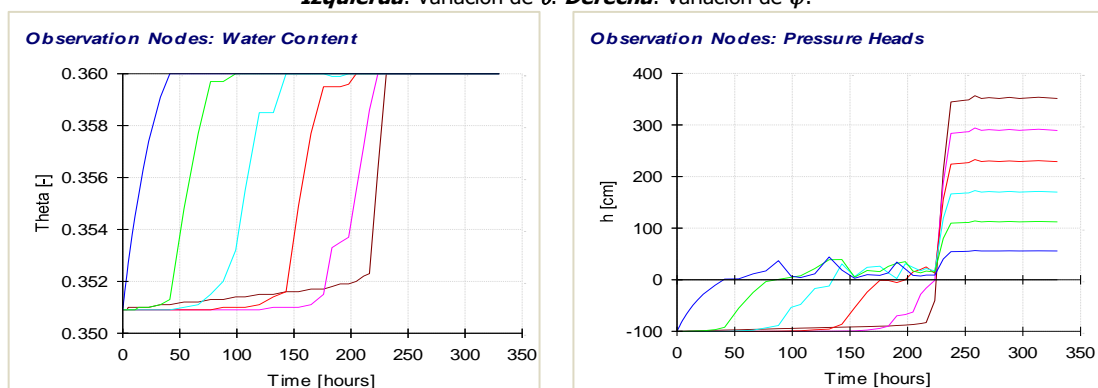


Figura AM 70. Valores para un espesor de **4,0 m**, en un suelo de textura: **Arcillo Limoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

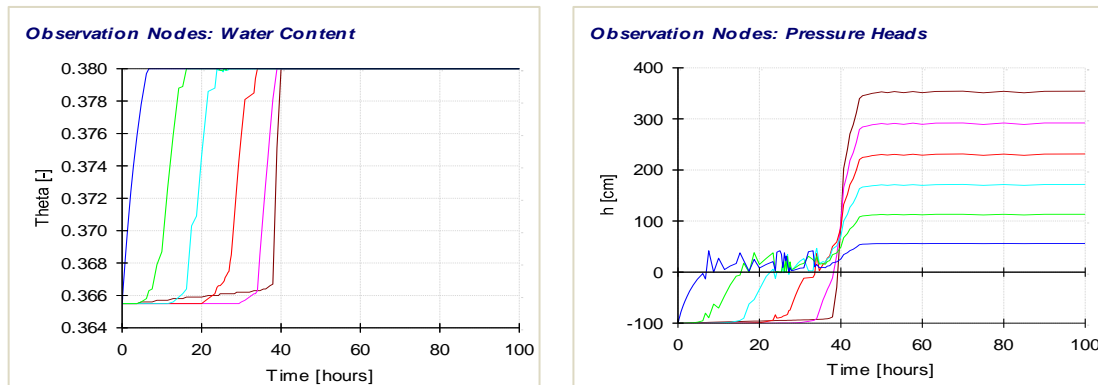


Figura AM 71. Valores para un espesor de **4,0 m**, en un suelo de textura: **Arcilla**.
Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

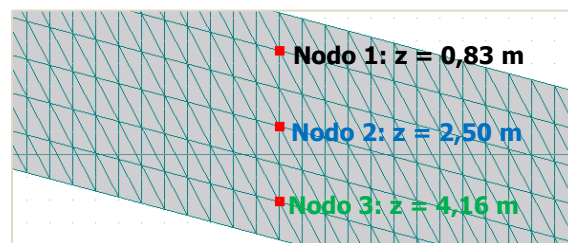


Figura AM 72. Ubicación de los 3 nodos de control en el centro del suelo, espesor de suelo: **5,0 m**.

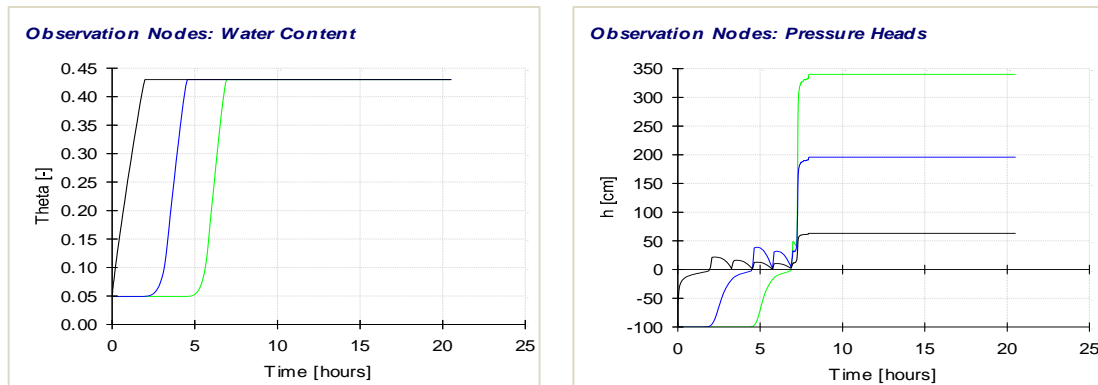


Figura AM 73. Valores para un espesor de **5,0 m**, en un suelo de textura: **Arena**.
Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

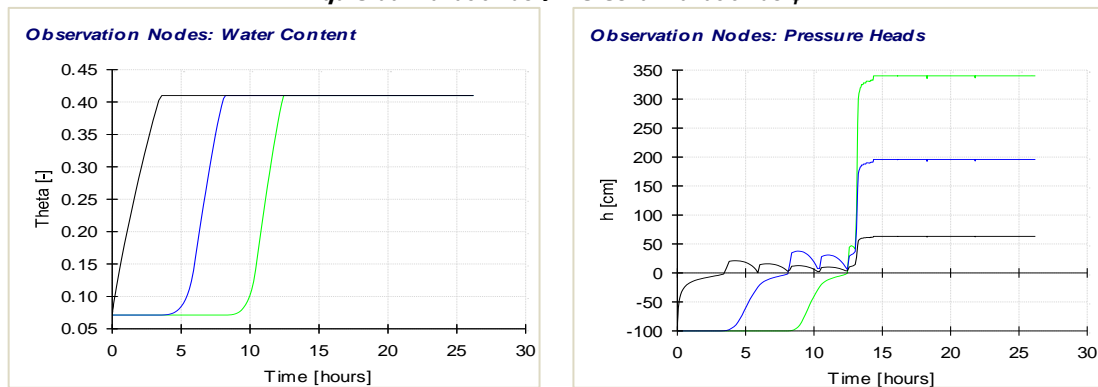


Figura AM 74. Valores para un espesor de **5,0 m**, en un suelo de textura: **Areno francoso**.
Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

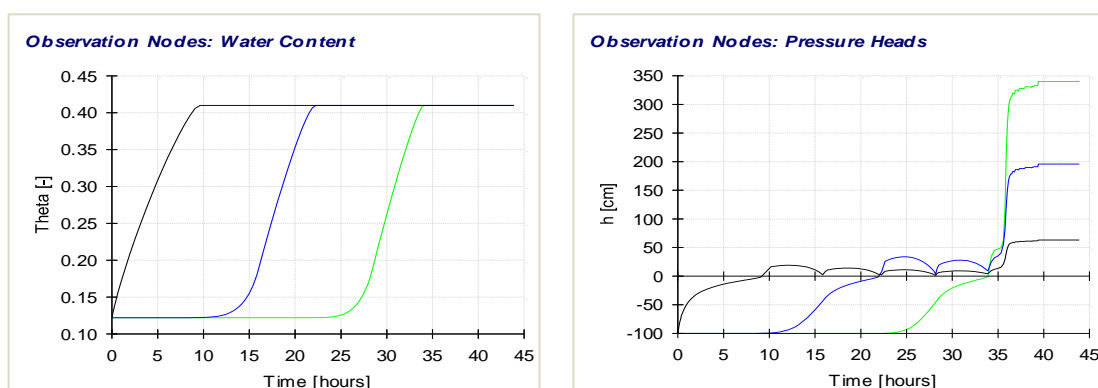


Figura AM 75. Valores para un espesor de **5,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Arenoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

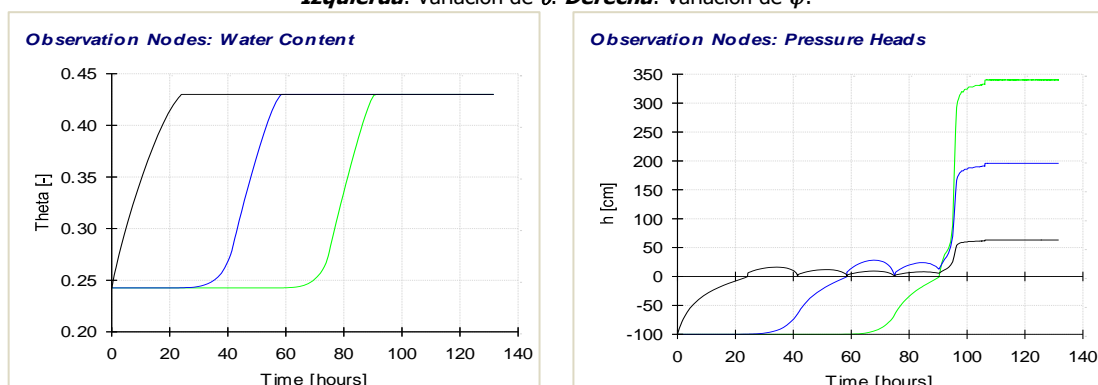


Figura AM 76. Valores para un espesor de **5,0 m**, en un suelo de textura: **Franco**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

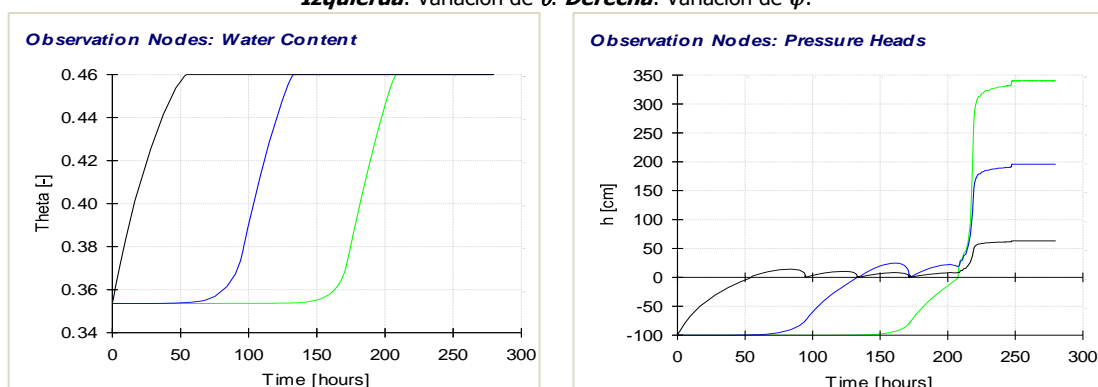


Figura AM 77. Valores para un espesor de **5,0 m**, en un suelo de textura: **Limo**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

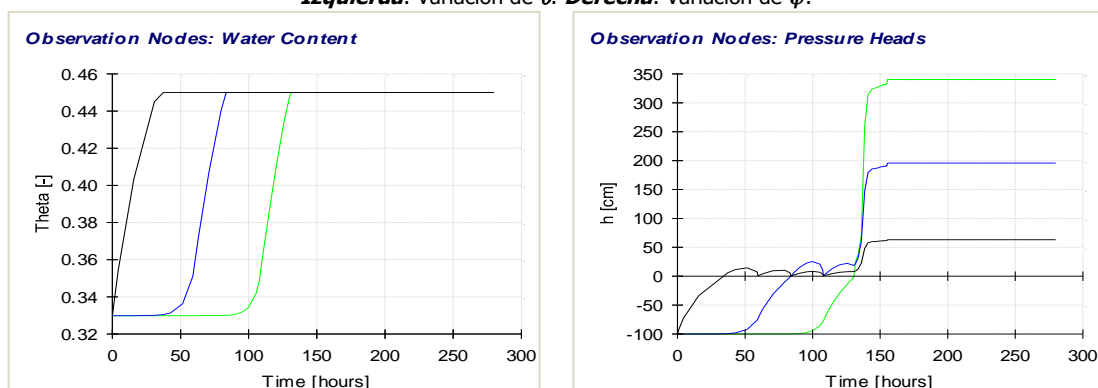


Figura AM 78. Valores para un espesor de **5,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Limoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

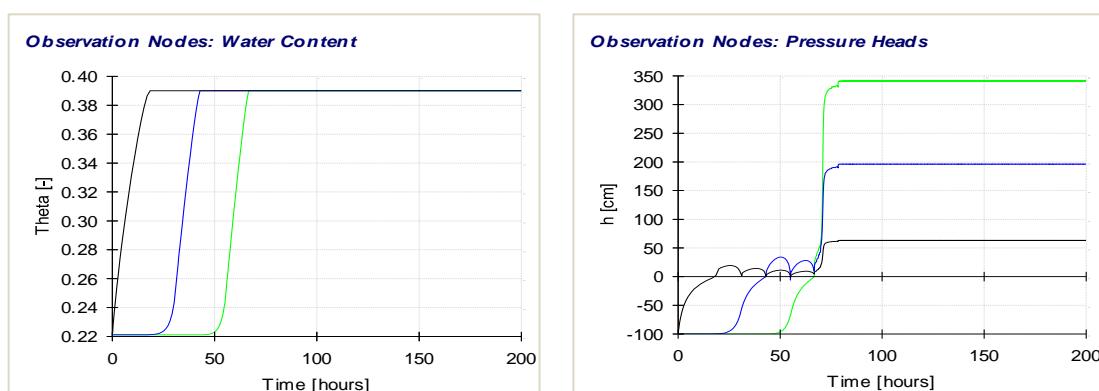


Figura AM 79. Valores para un espesor de **5,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Arcillo Arenoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

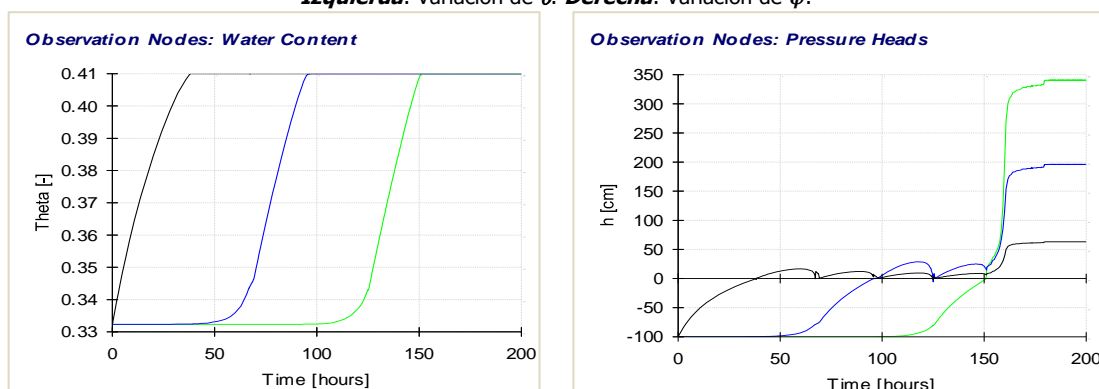


Figura AM 80. Valores para un espesor de **5,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Arcilloso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

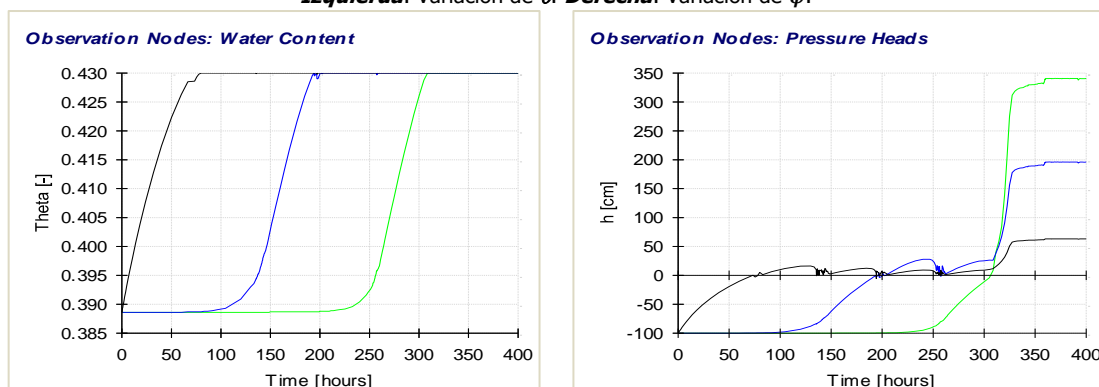


Figura AM 81. Valores para un espesor de **5,0 m**, en un suelo de textura: **Franco Arcillo Limoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

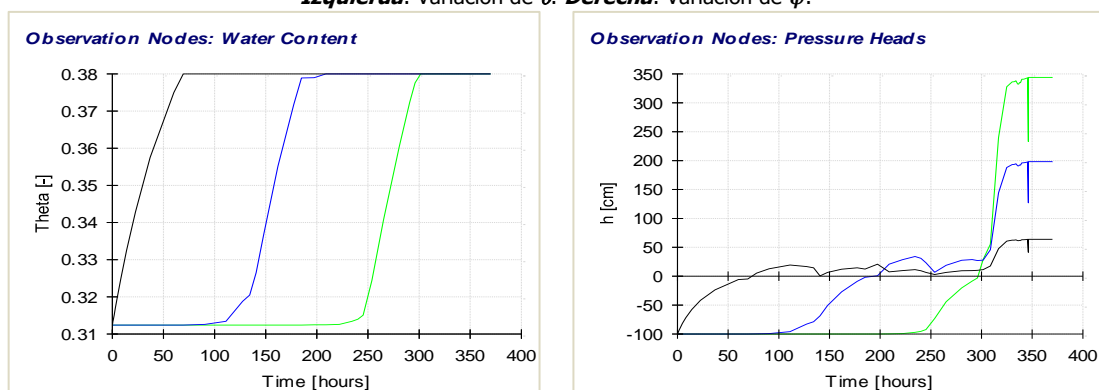


Figura AM 82. Valores para un espesor de **5,0 m**, en un suelo de textura: **Arcillo Arenoso**.

Izquierda: Variación de θ . *Derecha:* Variación de ψ .

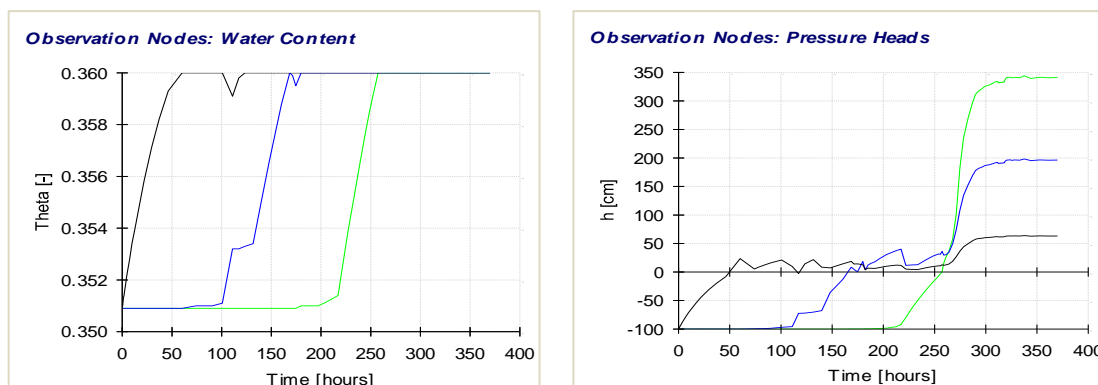


Figura AM 83. Valores para un espesor de **5,0 m**, en un suelo de textura: **Arcillo Limoso**.

Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

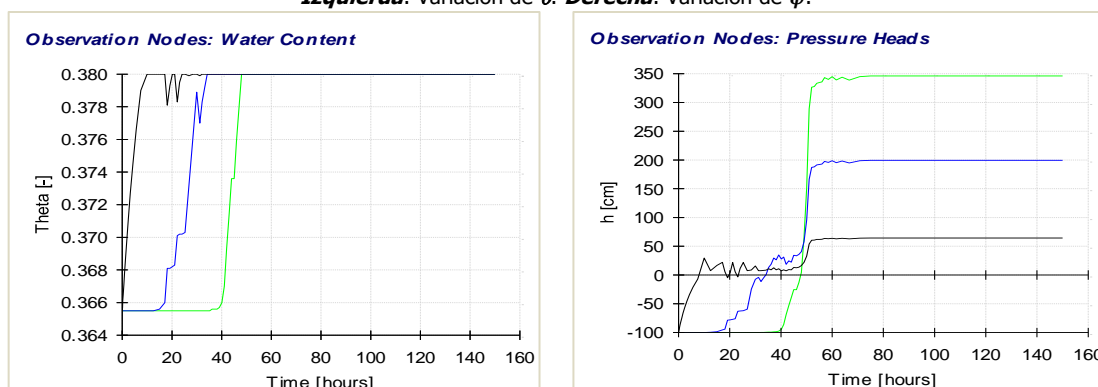


Figura AM 84. Valores para un espesor de **5,0 m**, en un suelo de textura: **Arcilla**.

Izquierda: Variación de θ . **Derecha:** Variación de ψ .

2. APÉNDICE NUMERAL 3.2.2 "MODELACIÓN EN 2-D CON VARIAS TEXTURAS DE SUELO"

Las siguientes figuras representan las cabezas de presión " ψ " y contenido volumétrico de agua " θ ", alcanzadas para las 6 combinaciones de texturas de suelos con las 3 formas geométricas modeladas, para 4 espesores diferentes. Cabeza de presión al comienzo de la simulación: $\psi_i = -100$ cm.

Combinación de posiciones de las texturas					
loamy sand silty loam clay loam	loamy sand clay loam silty loam	silty loam loamy sand clay loam	silty loam clay loam loamy sand	clay loam silty loam loamy sand	clay loam loamy sand silty loam
Combinación 1	Combinación 2	Combinación 3	Combinación 4	Combinación 5	Combinación 6

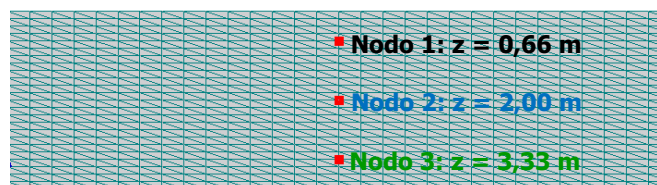
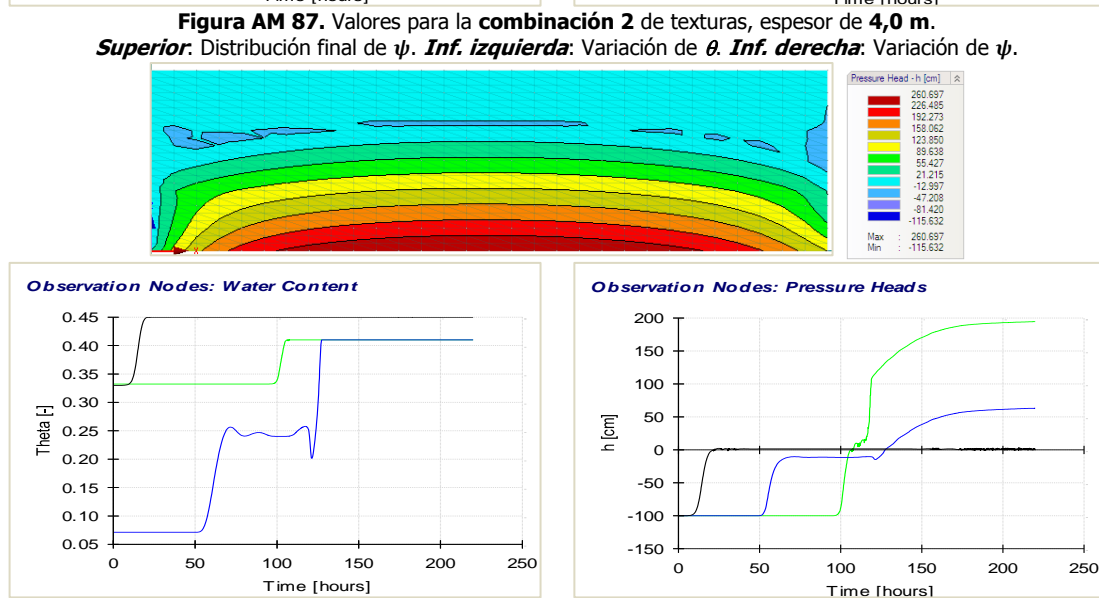
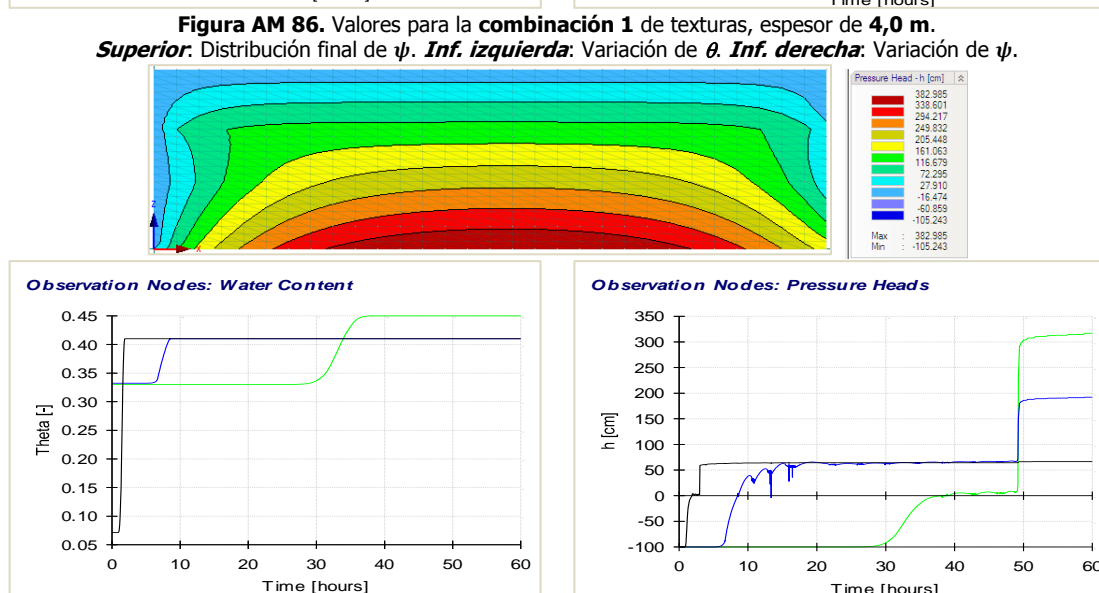
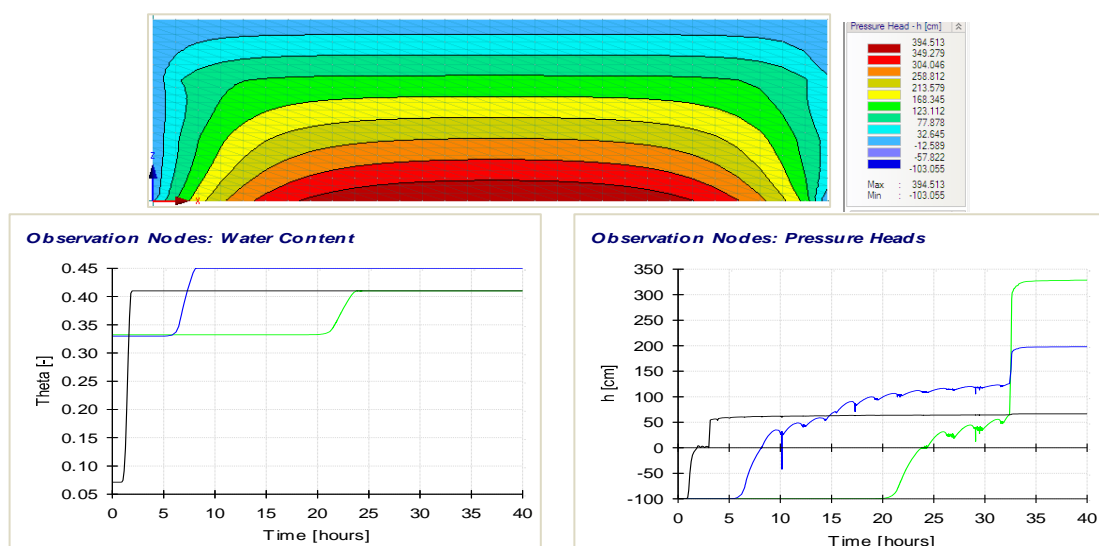
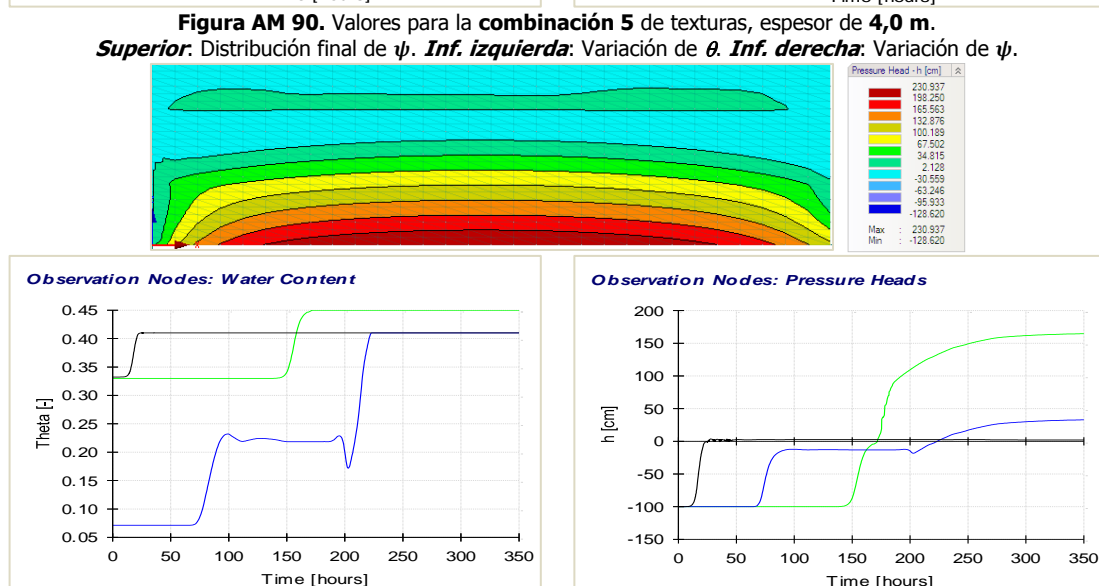
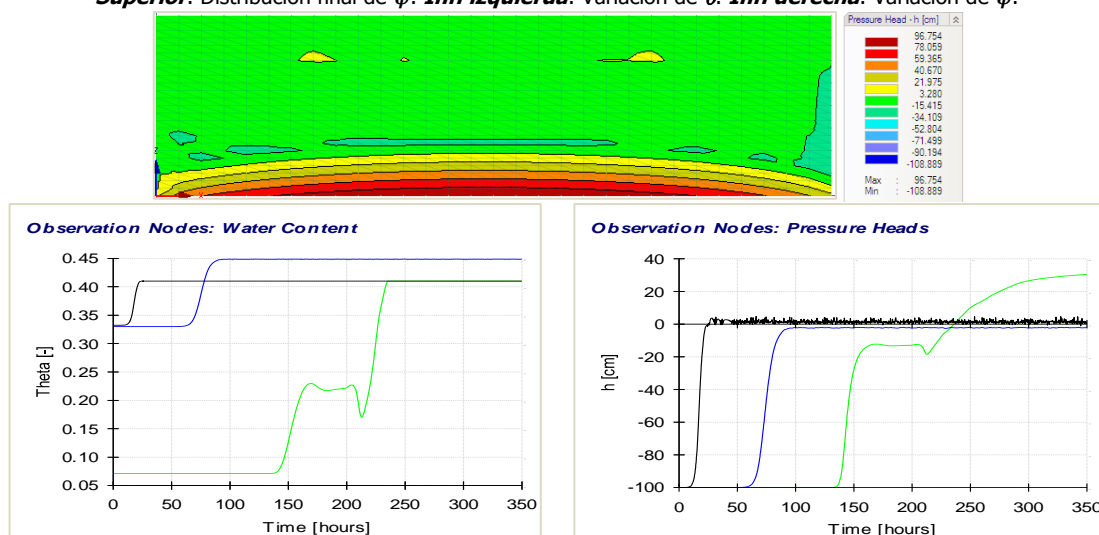
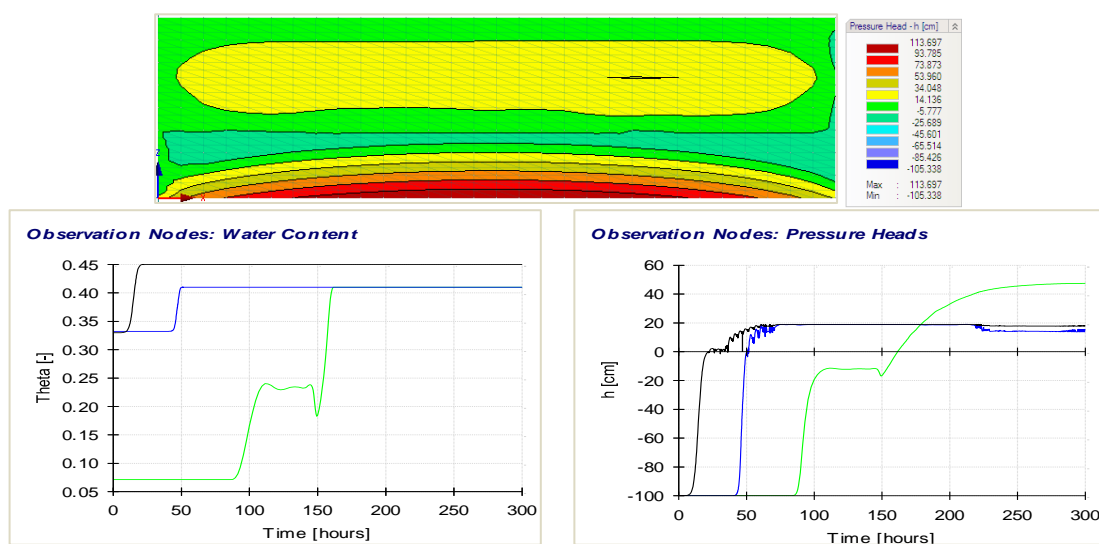


Figura AM 85. Ubicación de 3 nodos de control en el centro del suelo, espesor: **4,0 m**. **Forma rectangular**.





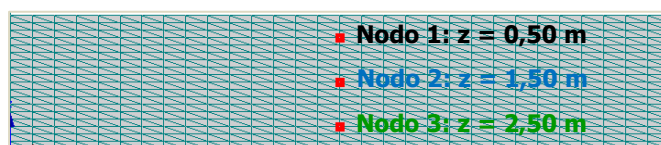


Figura AM 92. Ubicación de 3 nodos de control en el centro del suelo, espesor: **3,0 m**. Forma rectangular.

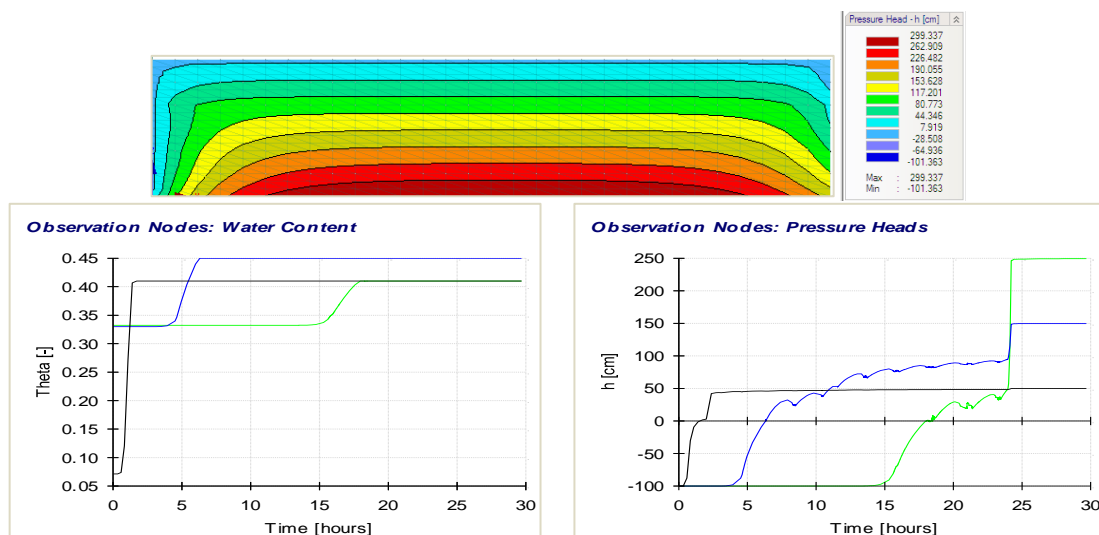


Figura AM 93. Valores para la **combinación 1** de texturas, espesor de **3,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

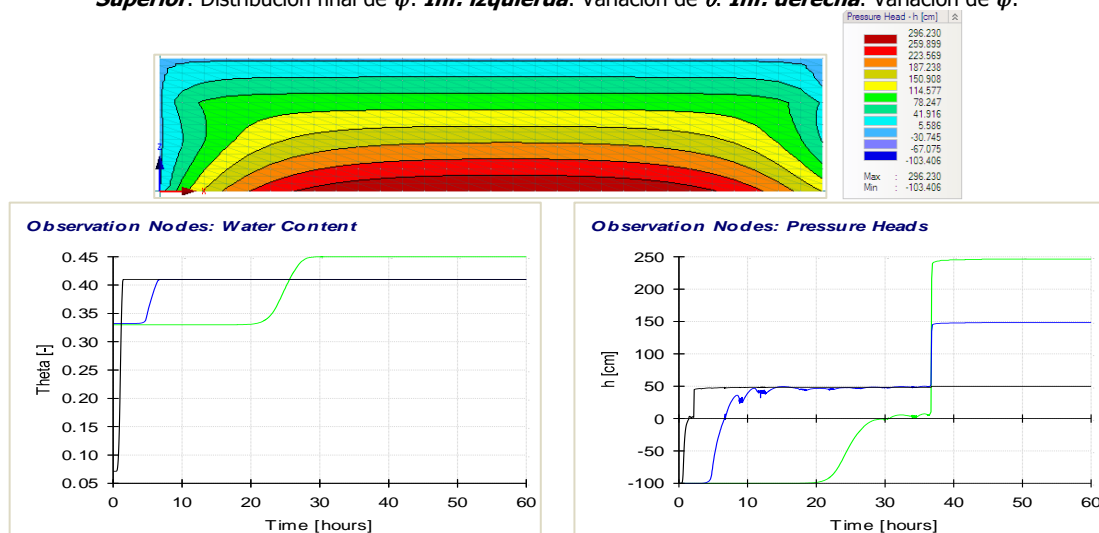


Figura AM 94. Valores para la **combinación 2** de texturas, espesor de **3,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

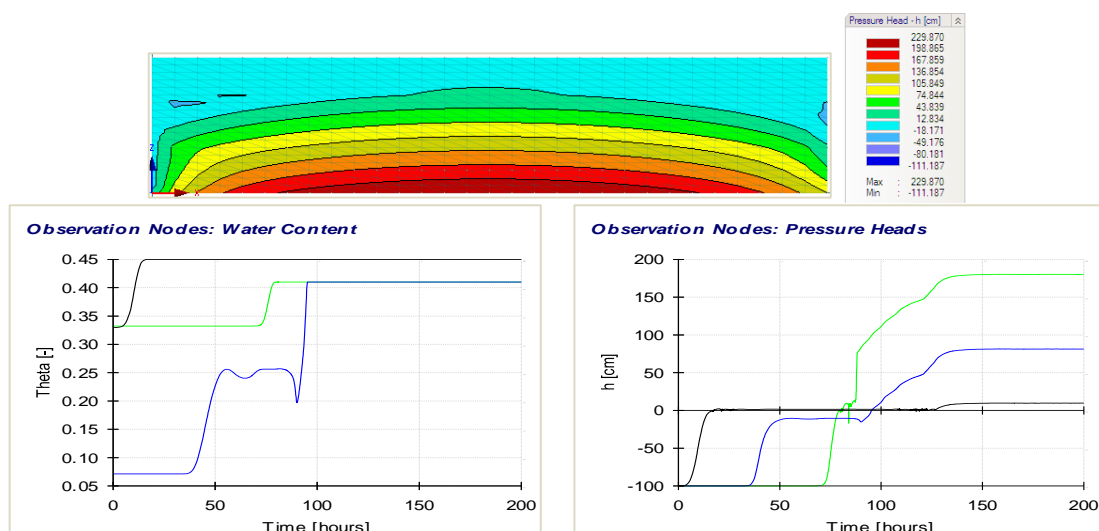


Figura AM 95. Valores para la **combinación 3** de texturas, espesor de **3,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

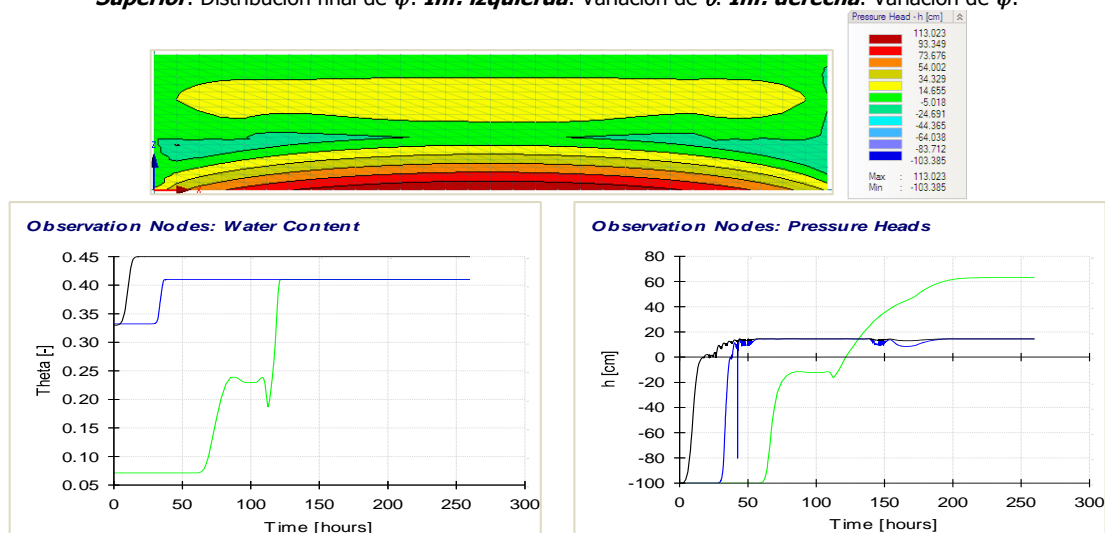


Figura AM 96. Valores para la **combinación 4** de texturas, espesor de **3,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

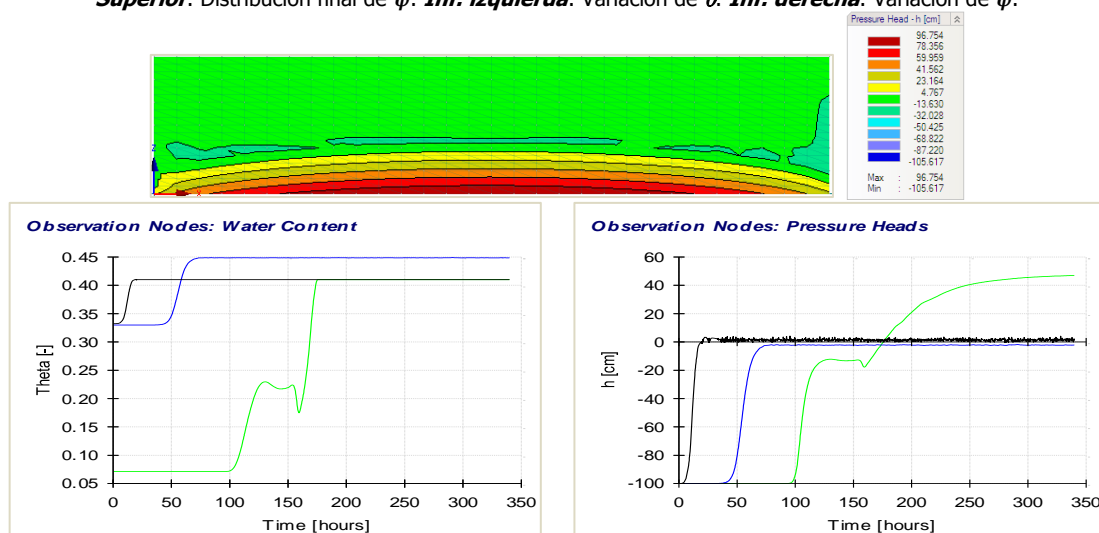


Figura AM 97. Valores para la **combinación 5** de texturas, espesor de **3,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

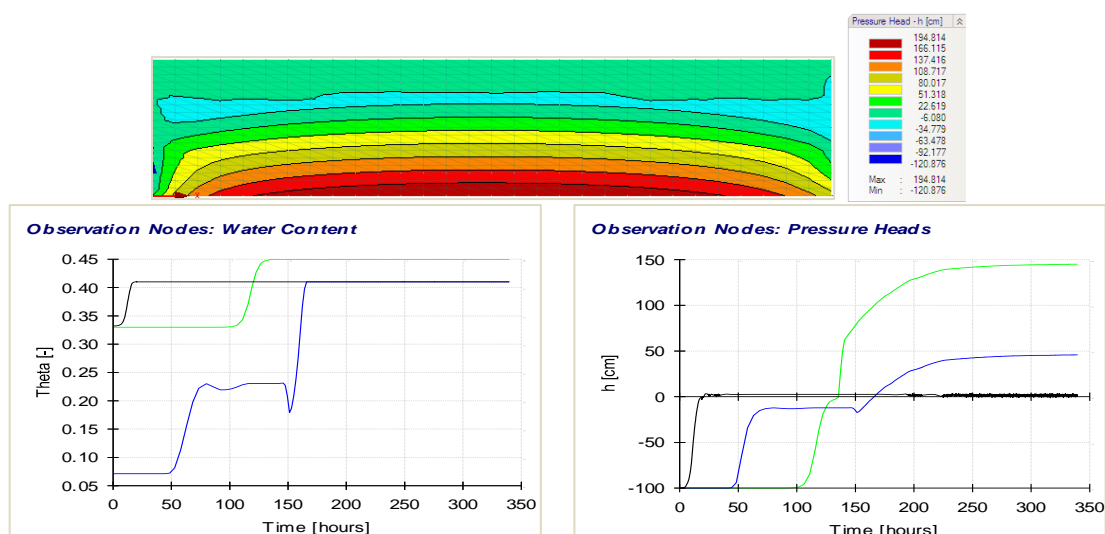


Figura AM 98. Valores para la **combinación 6** de texturas, espesor de **3,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

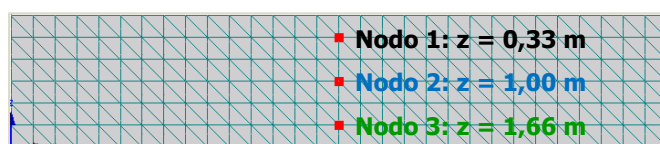


Figura AM 99. Ubicación de 3 nodos de control en el centro del suelo, espesor: **2,0 m**. **Forma rectangular.**

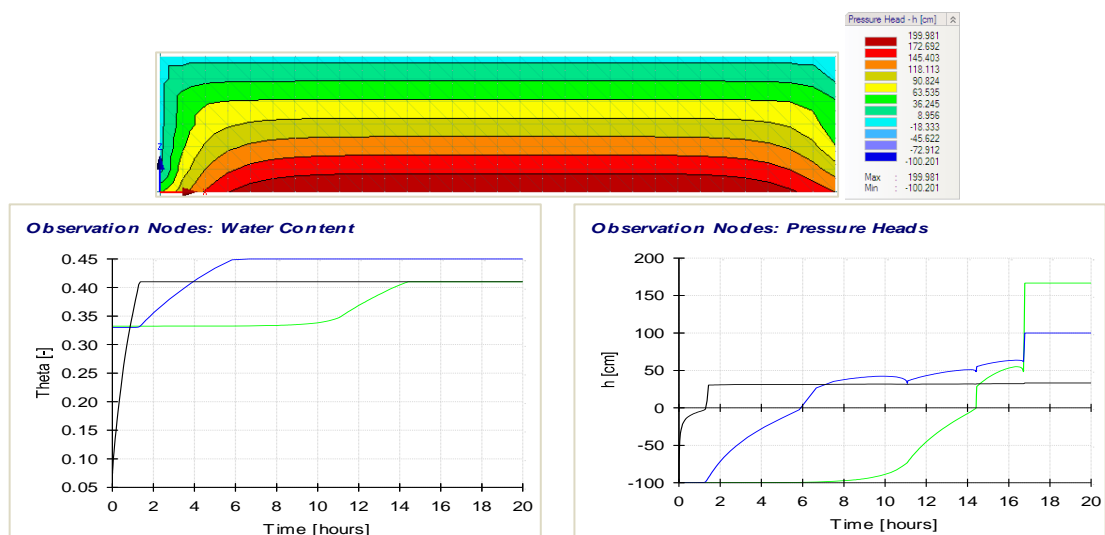


Figura AM 100. Valores para la **combinación 1** de texturas, espesor de **2,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

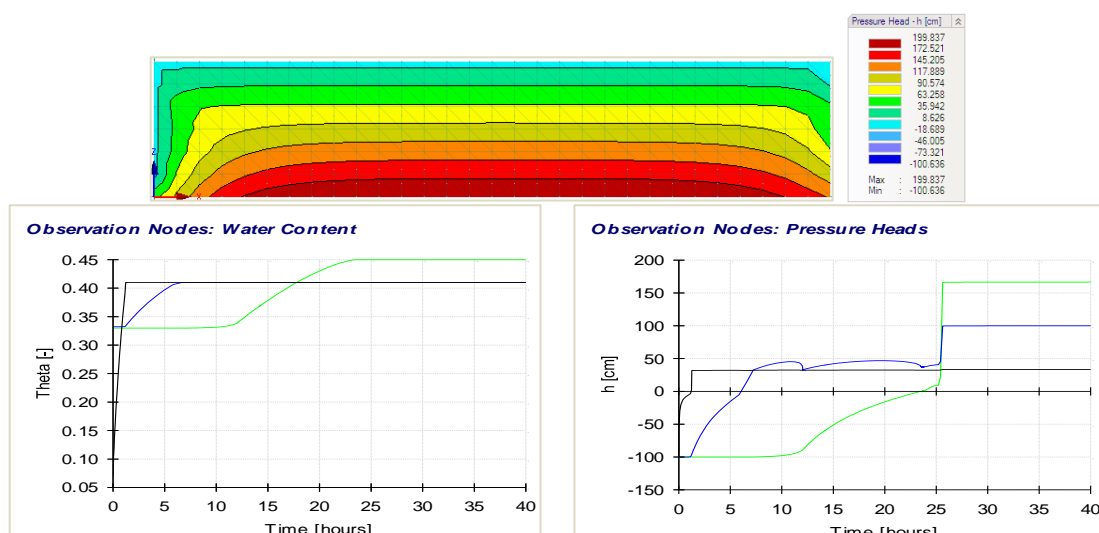


Figura AM 101. Valores para la **combinación 2** de texturas, espesor de **2,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

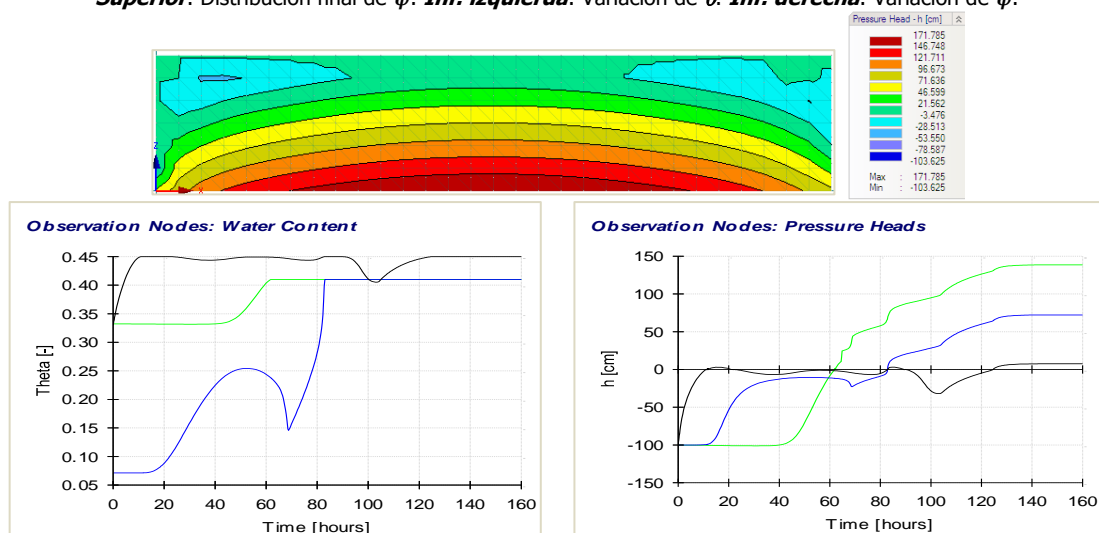


Figura AM 102. Valores para la **combinación 3** de texturas, espesor de **2,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

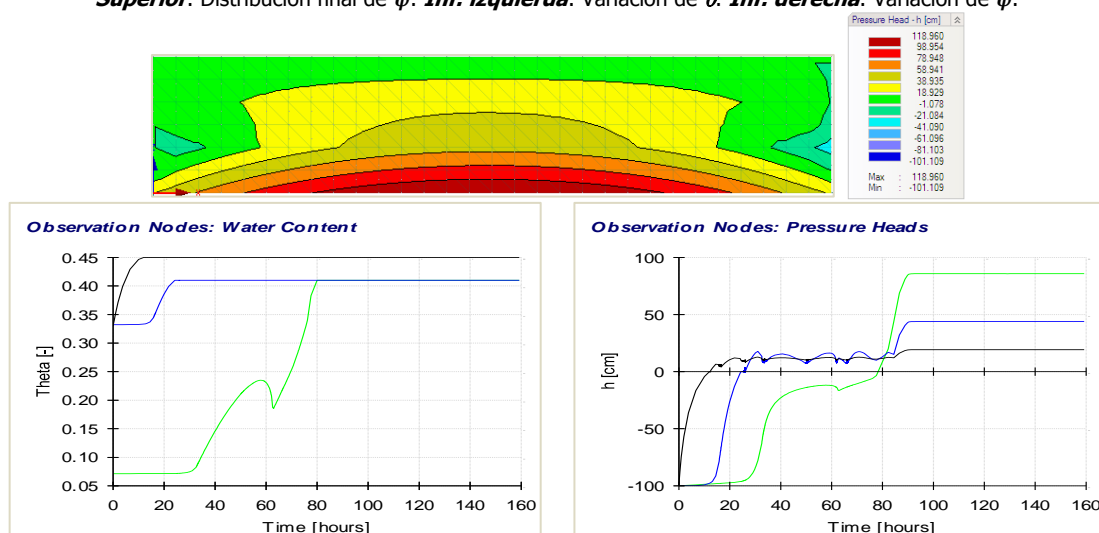


Figura AM 103. Valores para la **combinación 4** de texturas, espesor de **2,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

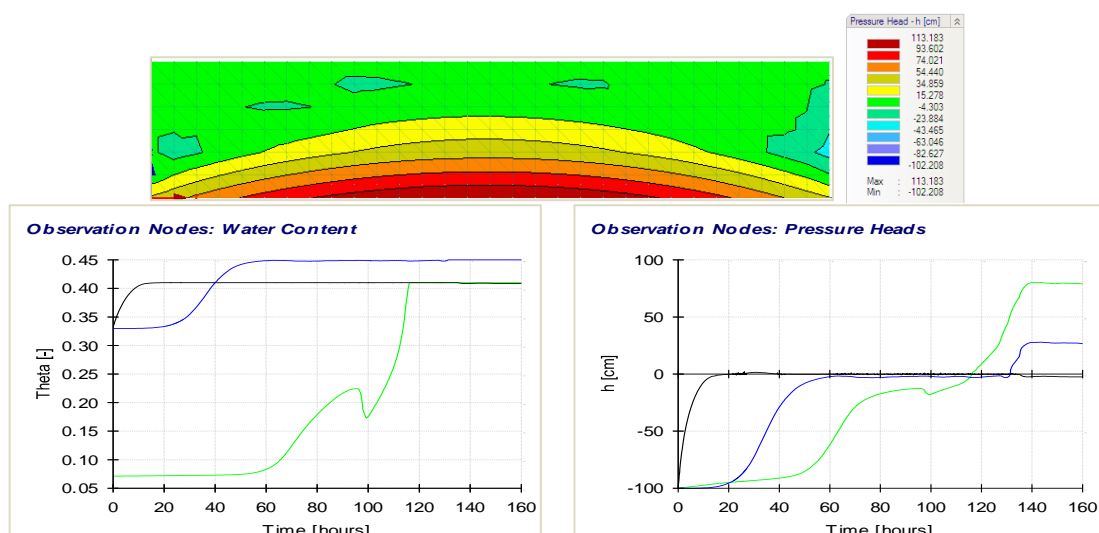


Figura AM 104. Valores para la **combinación 5** de texturas, espesor de **2,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

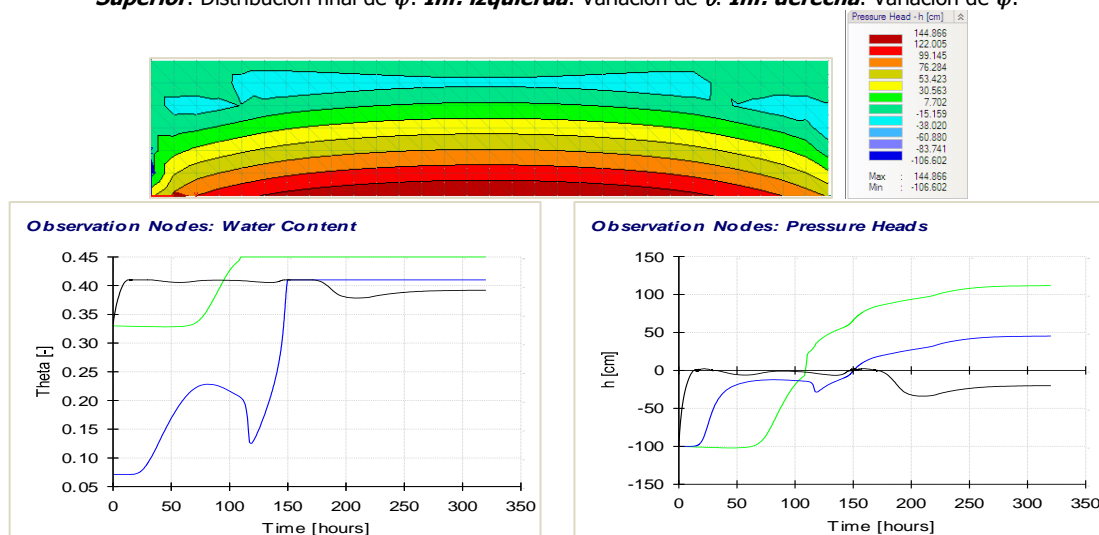


Figura AM 105. Valores para la **combinación 6** de texturas, espesor de **2,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

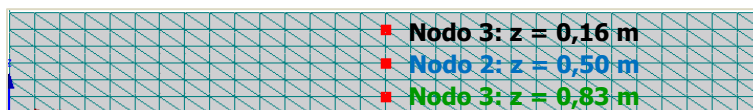
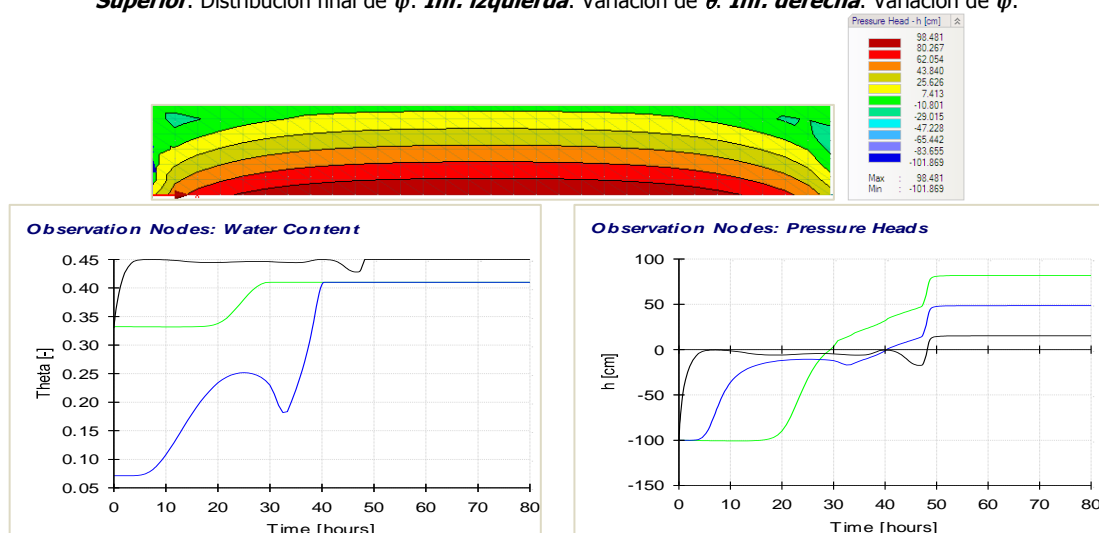
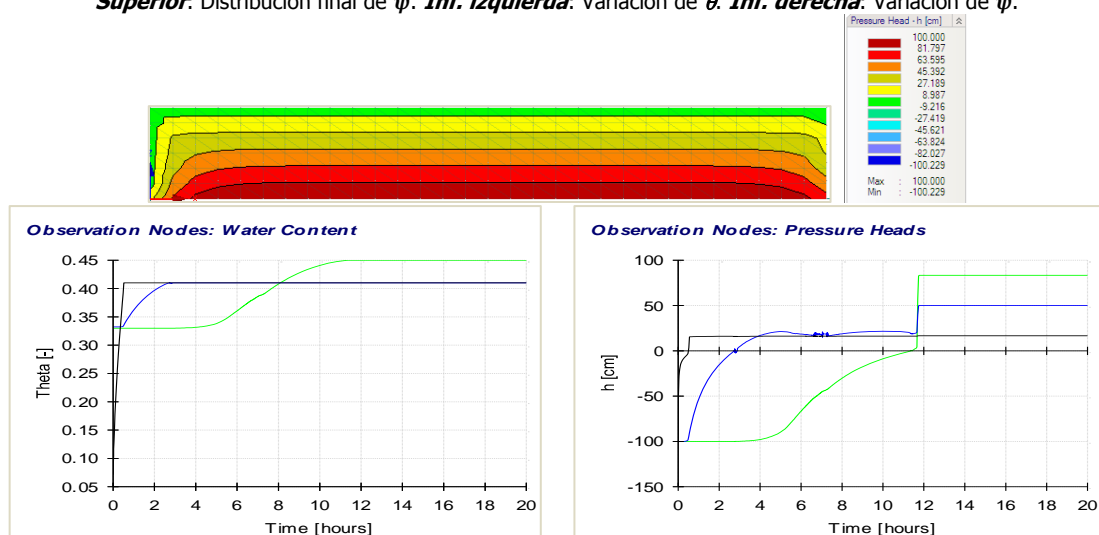
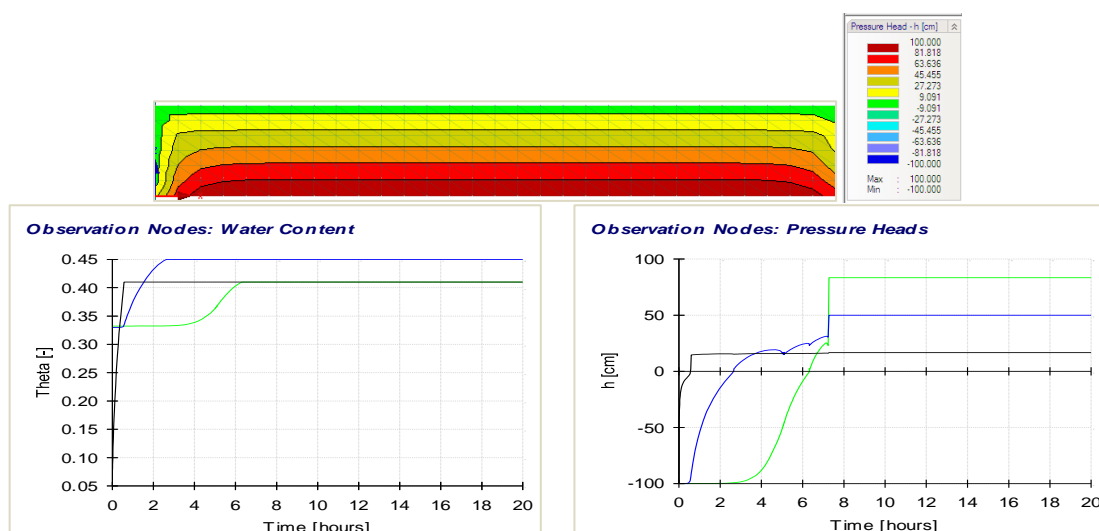
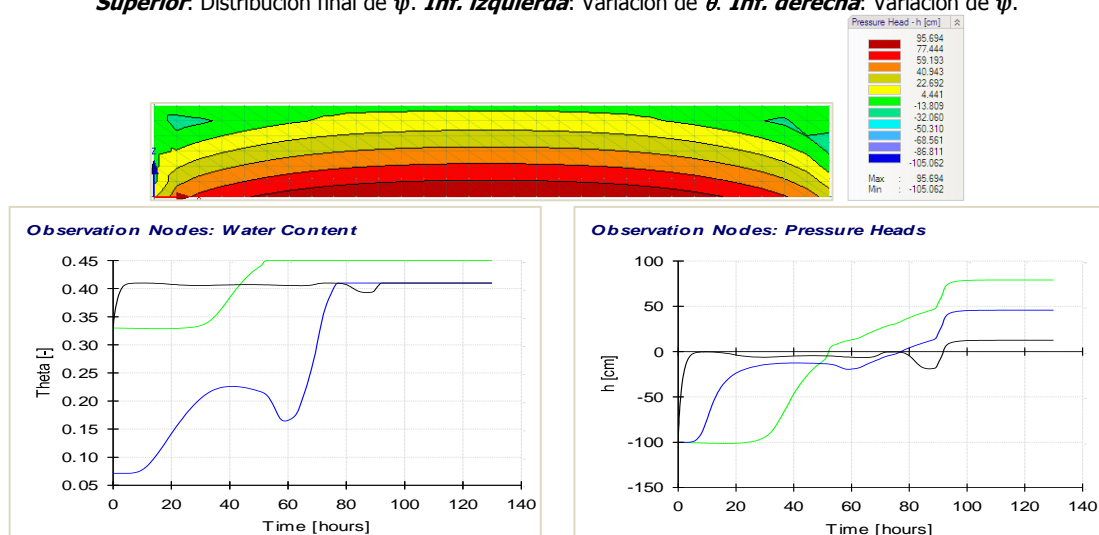
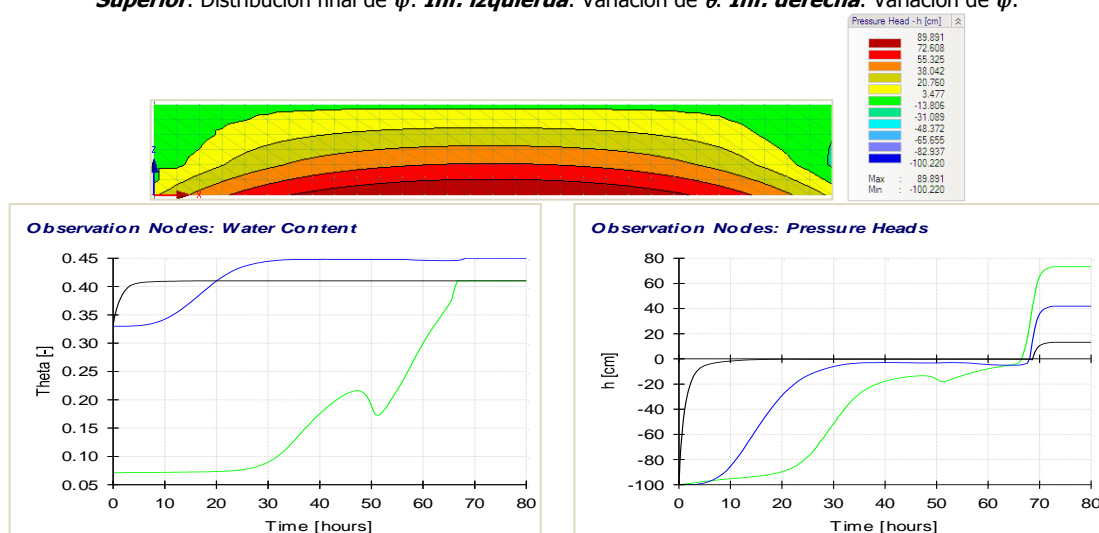
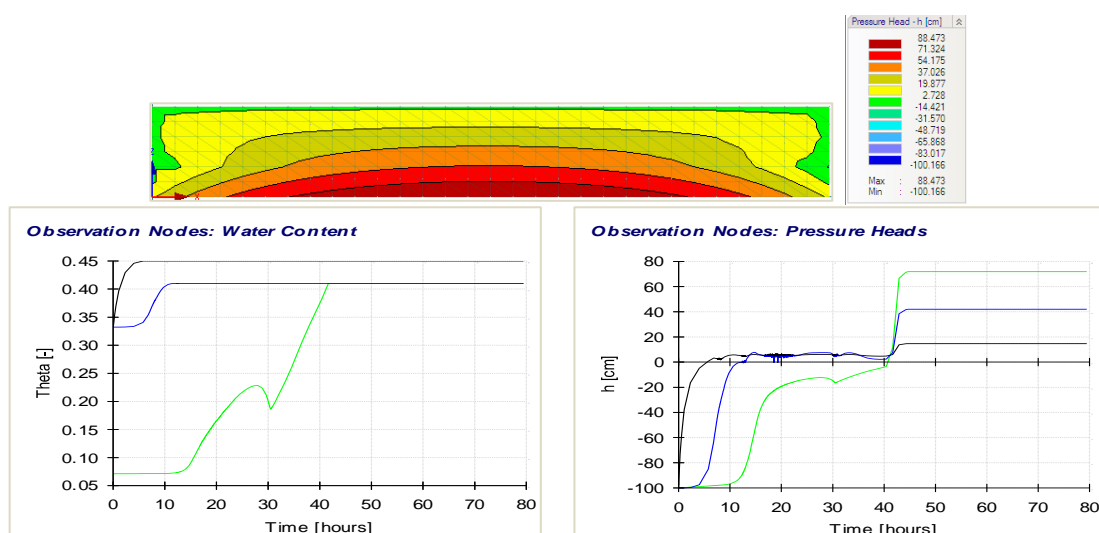


Figura AM 106. Ubicación de 3 nodos de control en el centro del suelo, espesor: **1,0 m**. Forma rectangular.





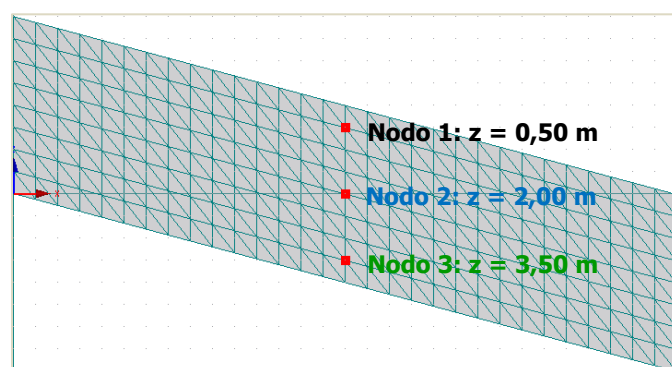


Figura AM 113. Ubicación de 3 nodos de control, centro del suelo, espesor: **4,0 m**. Forma rectangular inclinada **15°**.

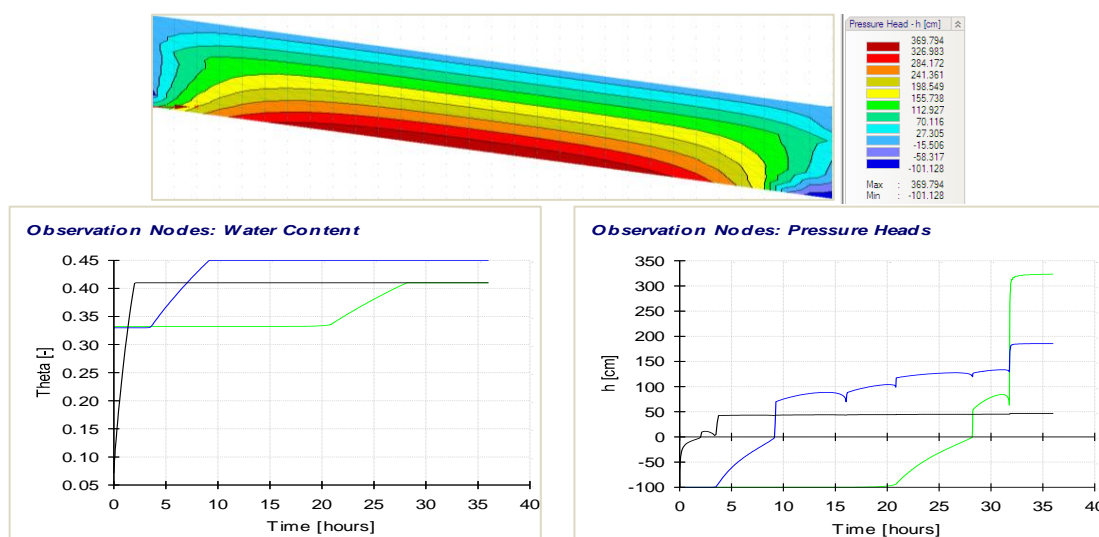


Figura AM 114. Valores para la **combinación 1** de texturas, espesor de **4,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

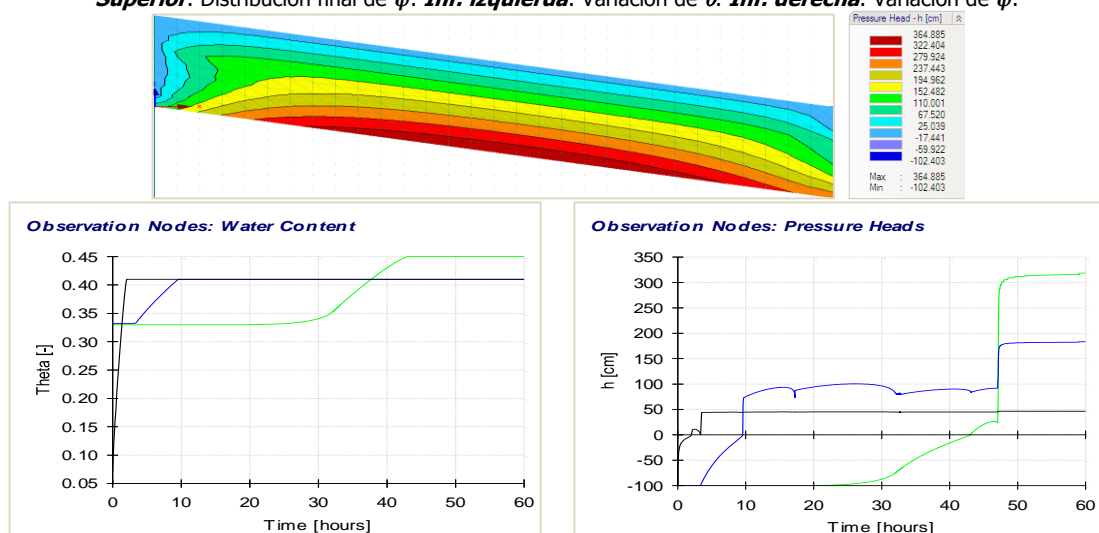
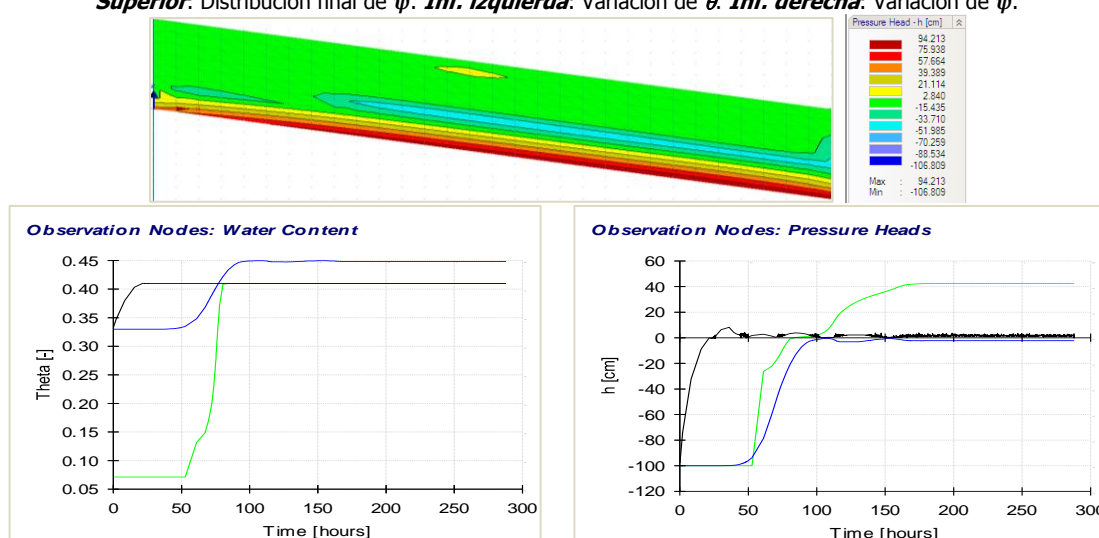
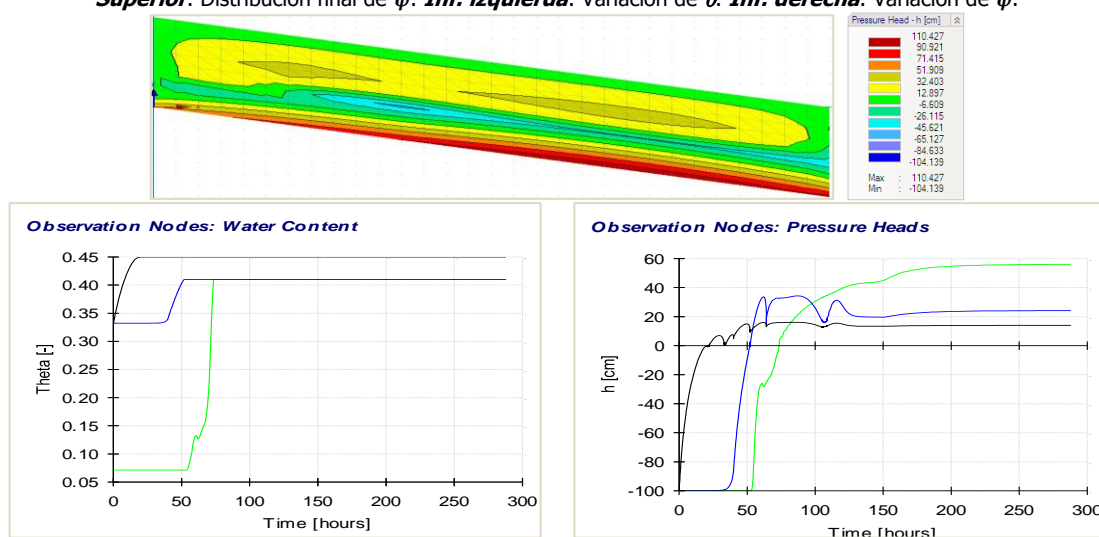
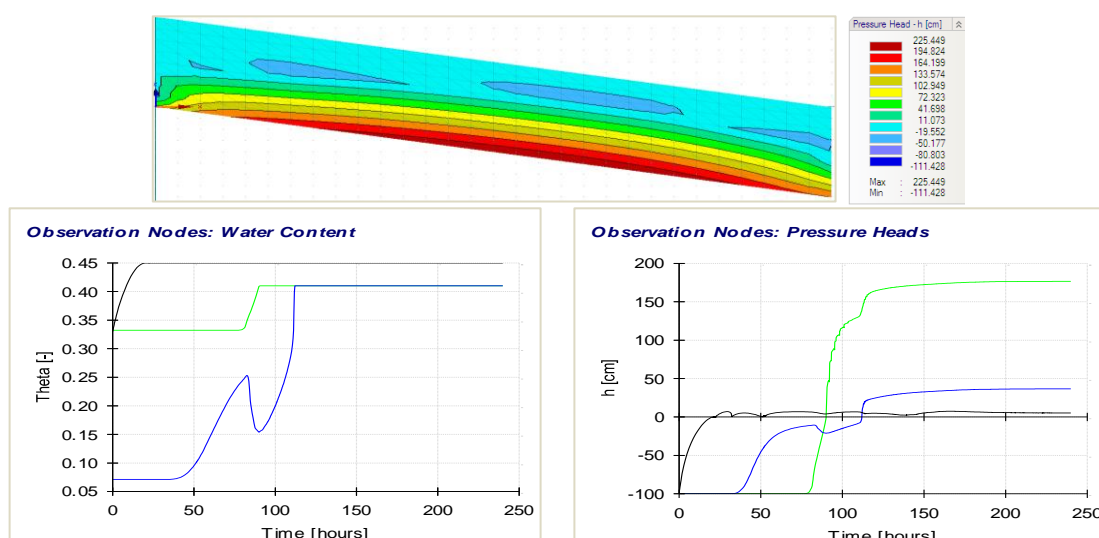


Figura AM 115. Valores para la **combinación 2** de texturas, espesor de **4,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .



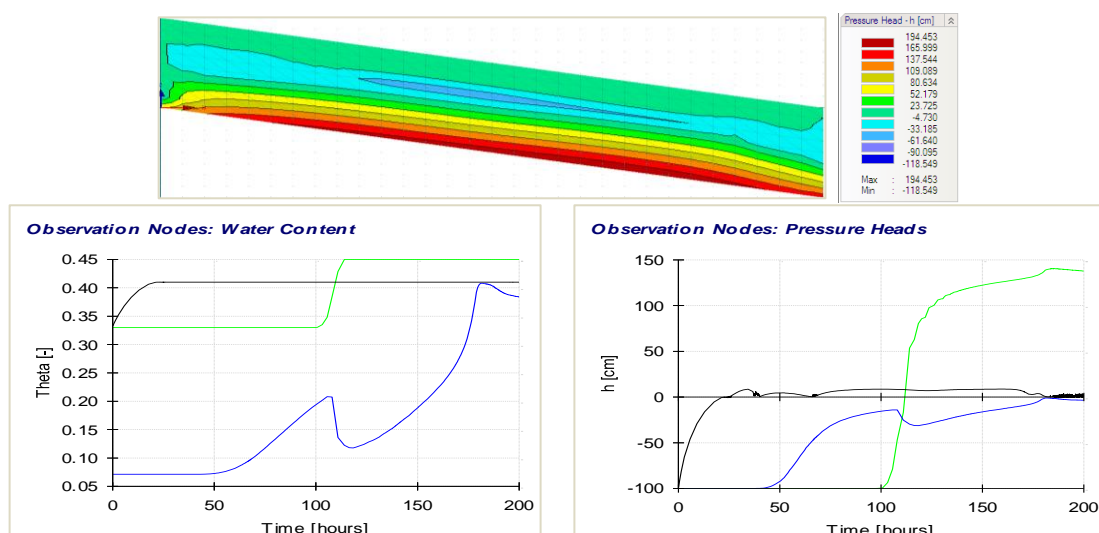


Figura AM 119. Valores para la combinación 6 de texturas, espesor de 4,0 m.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

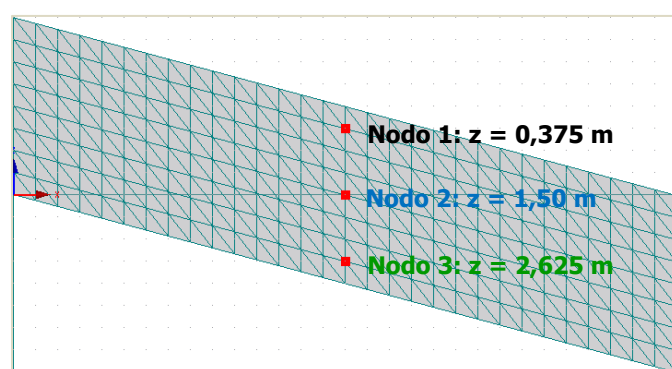


Figura AM 120. Ubicación de 3 nodos de control, centro del suelo, espesor: 3,0 m. Forma rectangular inclinada 15°.

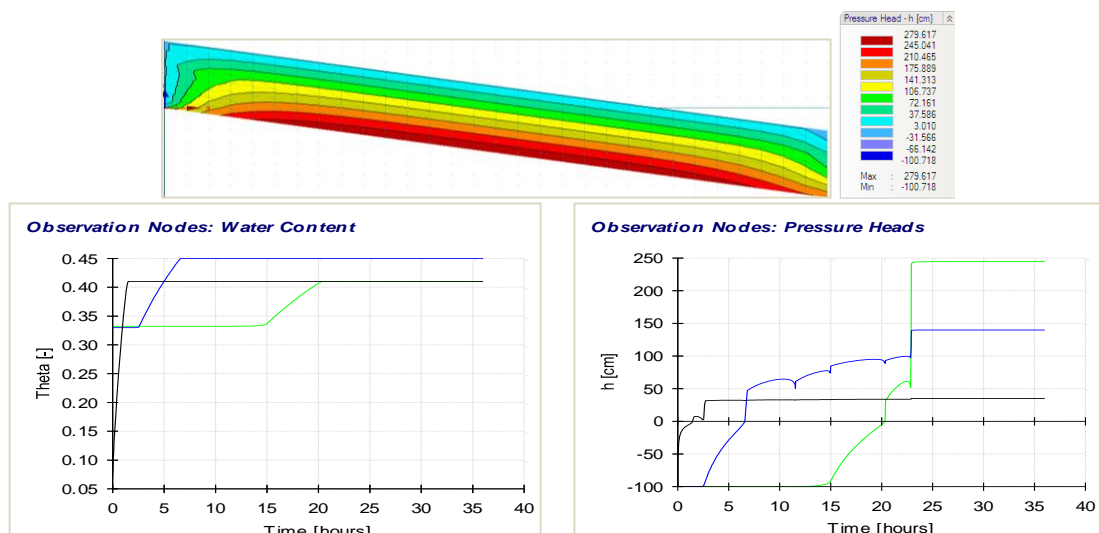
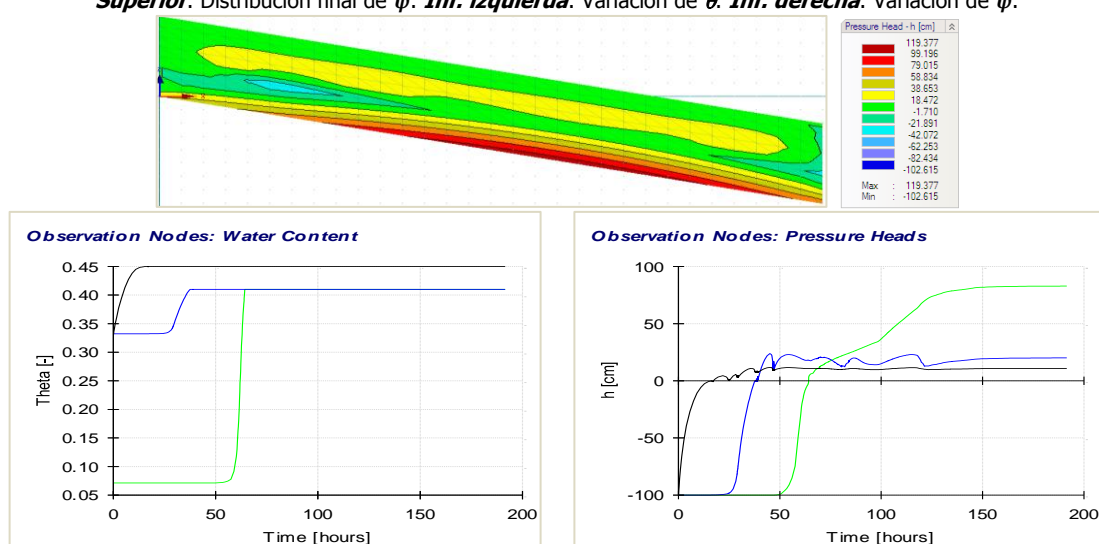
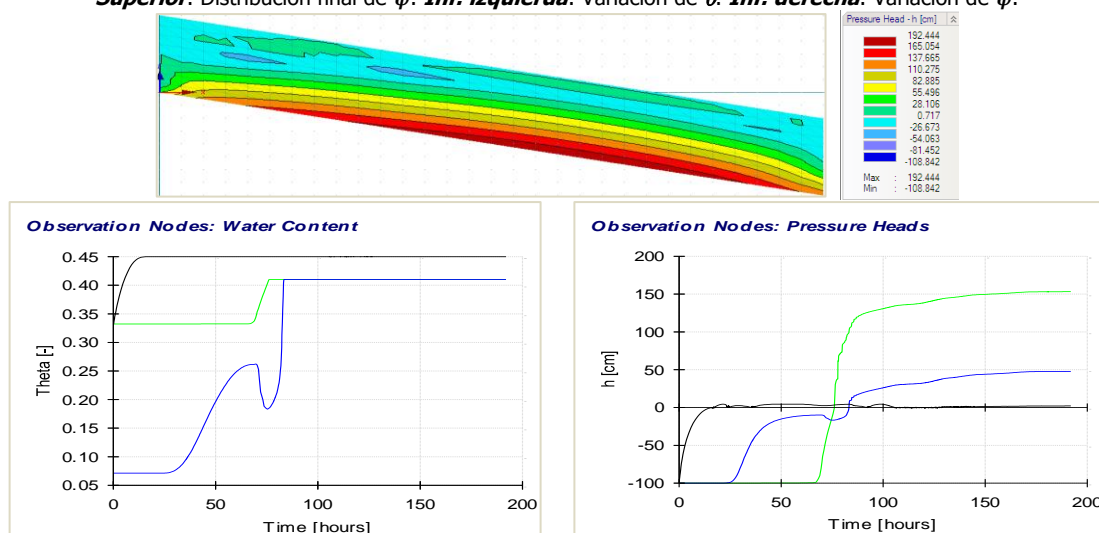
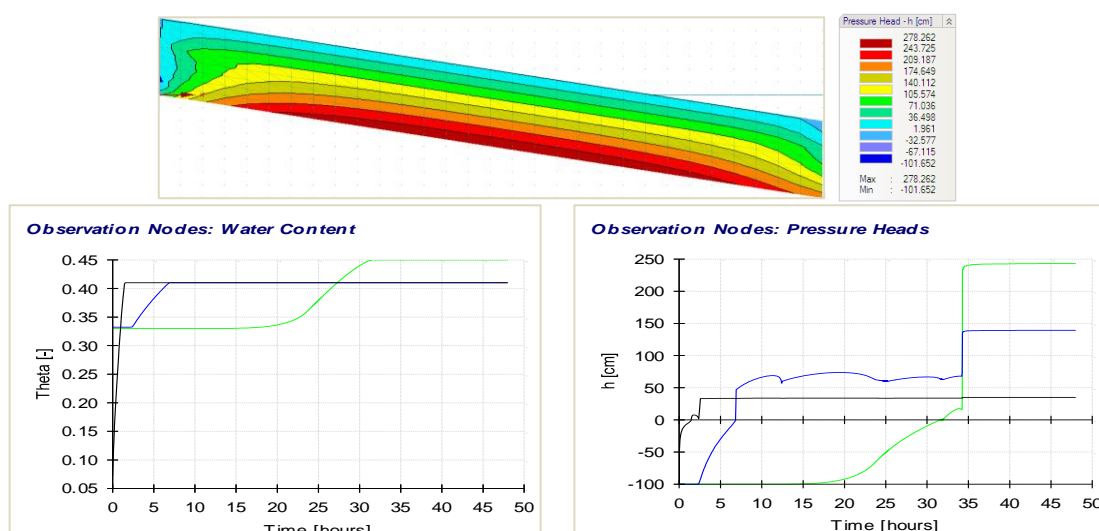


Figura AM 121. Valores para la combinación 1 de texturas, espesor de 3,0 m.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .



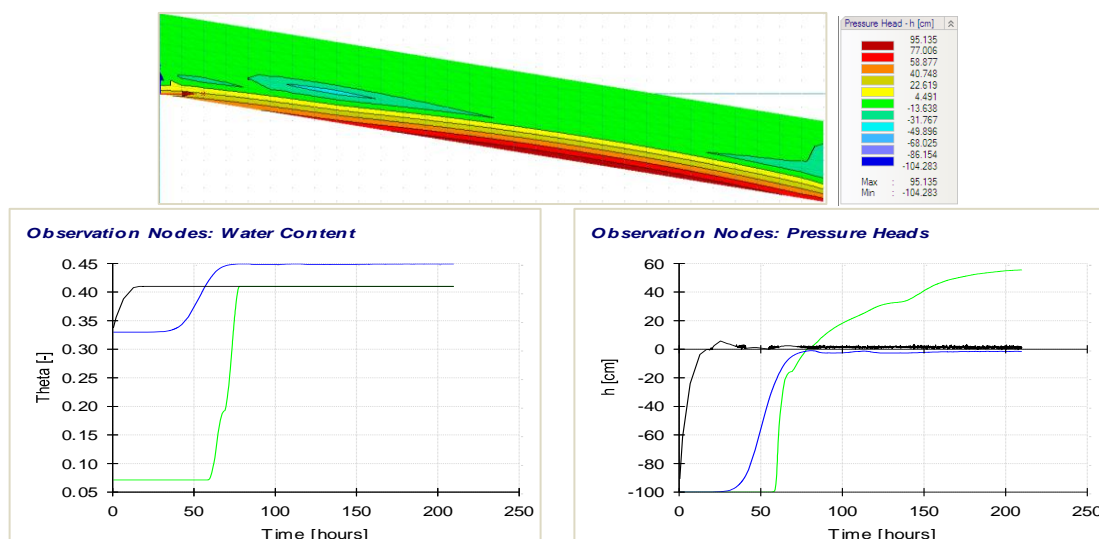


Figura AM 125. Valores para la combinación 5 de texturas, espesor de 3,0 m.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

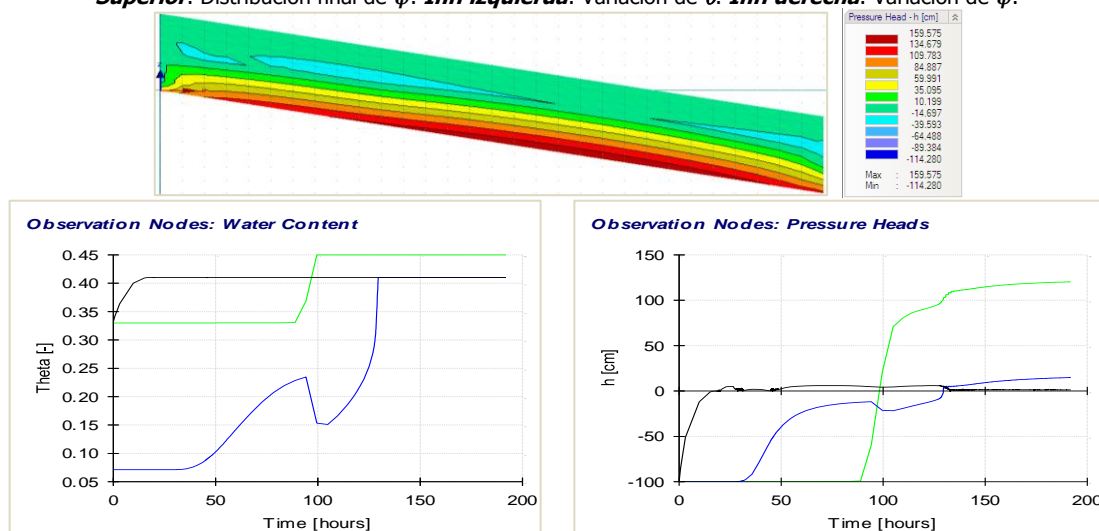


Figura AM 126. Valores para la combinación 6 de texturas, espesor de 3,0 m.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

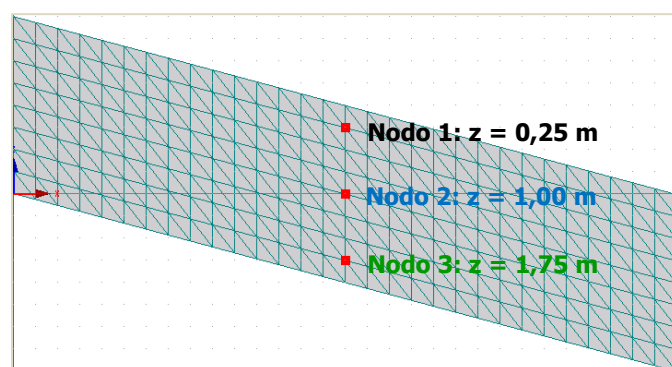


Figura AM 127. Ubicación de 3 nodos de control, centro del suelo, espesor: 2,0 m. Forma rectangular inclinada 15°.

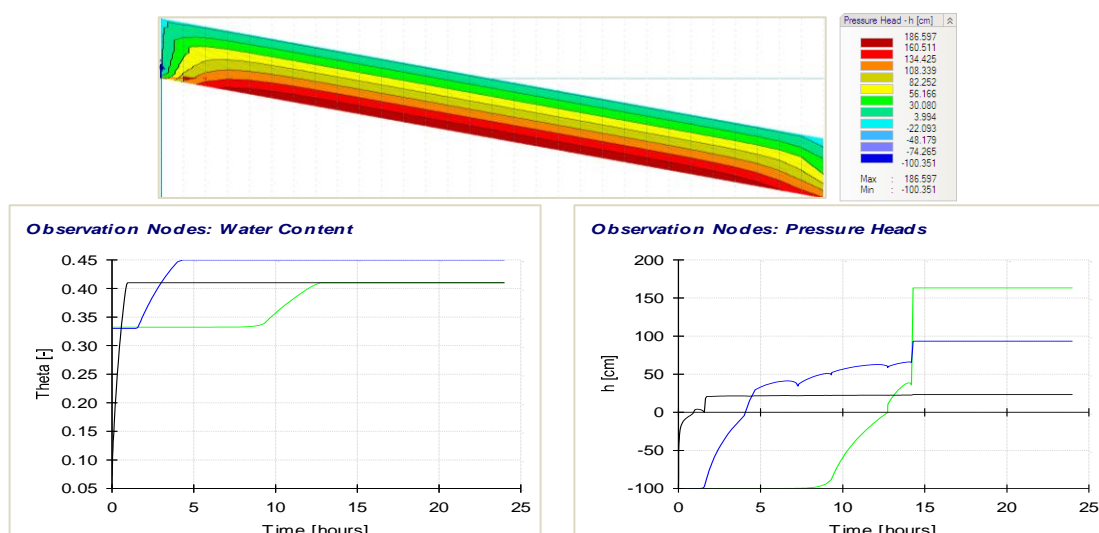


Figura AM 128. Valores para la **combinación 1** de texturas, espesor de **2,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

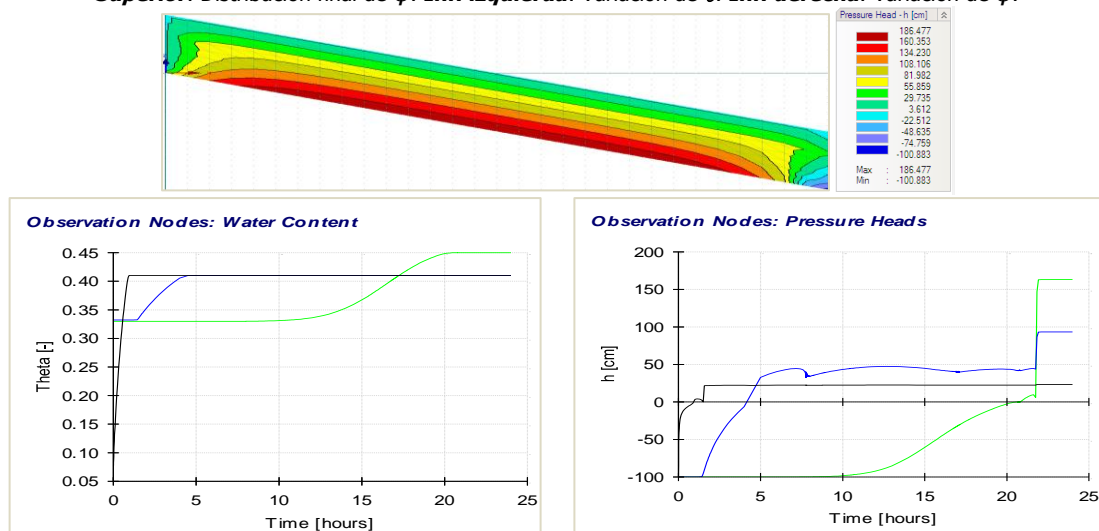


Figura AM 129. Valores para la **combinación 2** de texturas, espesor de **2,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

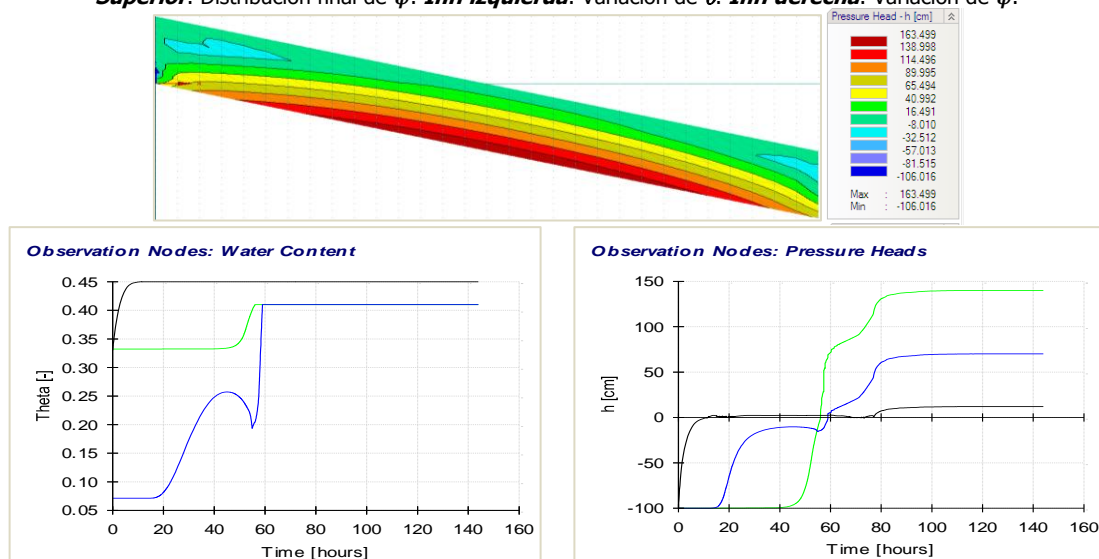


Figura AM 130. Valores para la **combinación 3** de texturas, espesor de **2,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

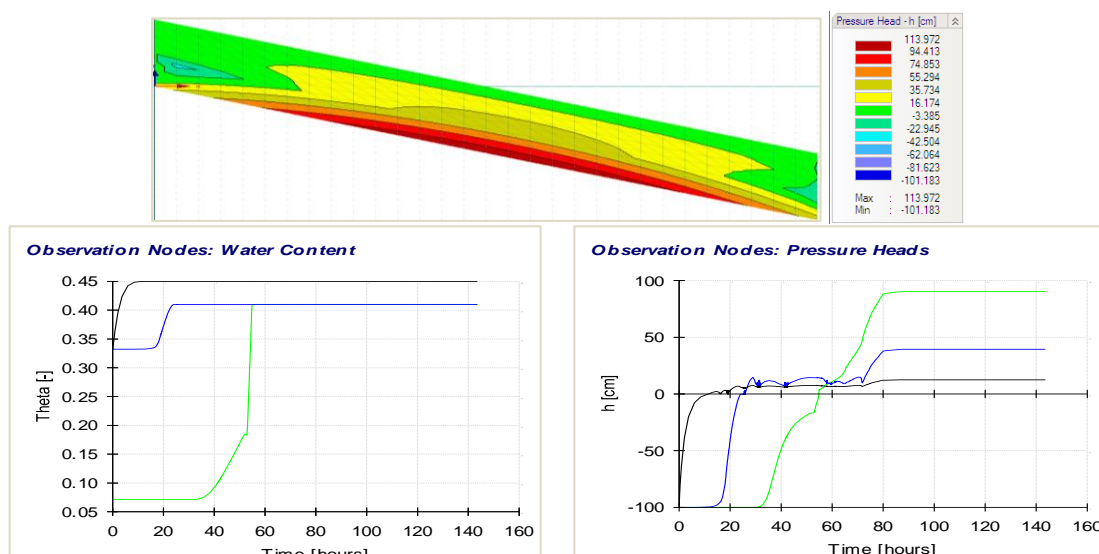


Figura AM 131. Valores para la **combinación 4** de texturas, espesor de **2,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

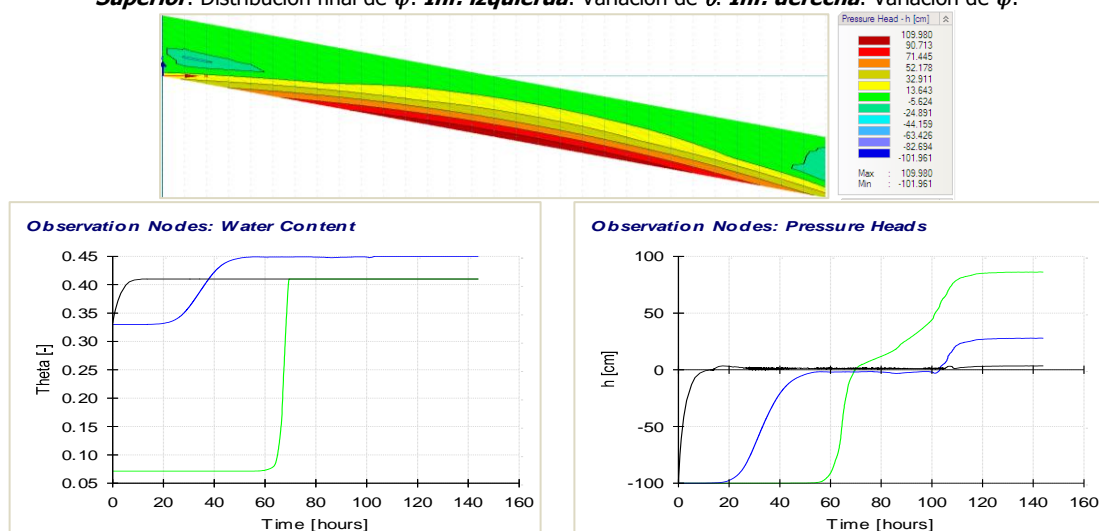


Figura AM 132. Valores para la **combinación 5** de texturas, espesor de **3,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

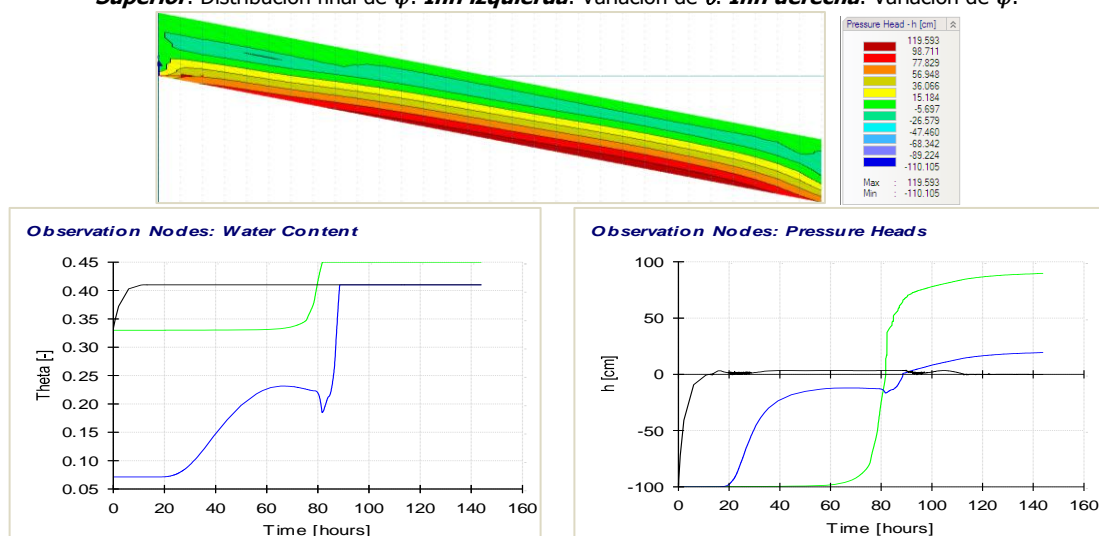


Figura AM 133. Valores para la **combinación 6** de texturas, espesor de **2,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

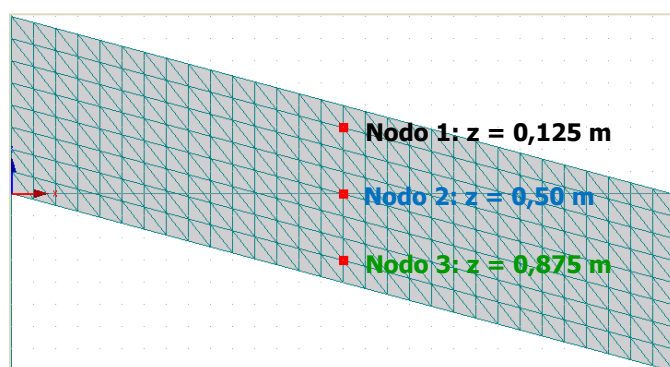


Figura AM 134. Ubicación de 3 nodos de control, centro del suelo, espesor: **1,0 m**. Forma rectangular inclinada **15°**.

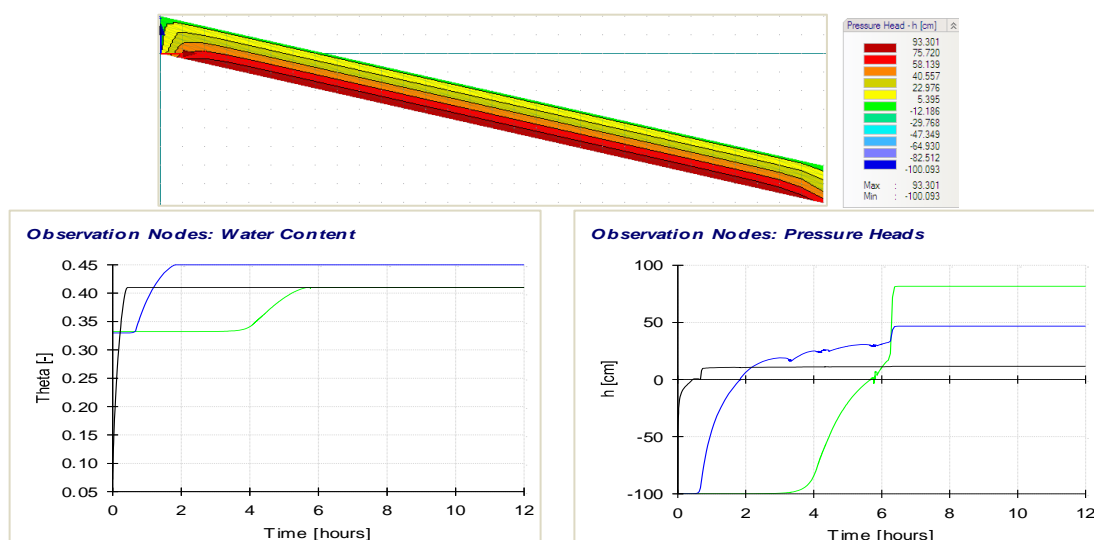


Figura AM 135. Valores para la **combinación 1** de texturas, espesor de **1,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

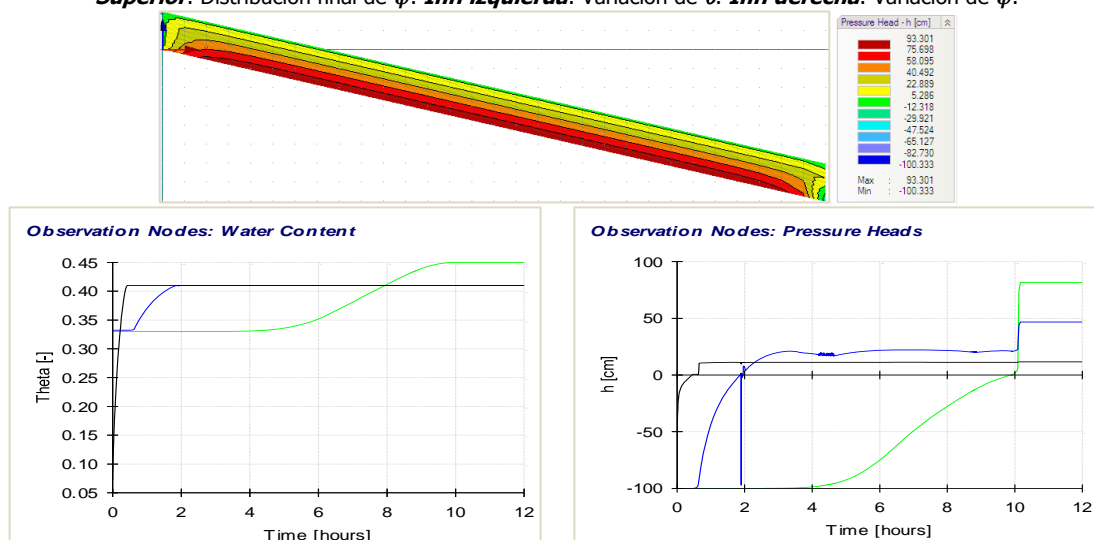
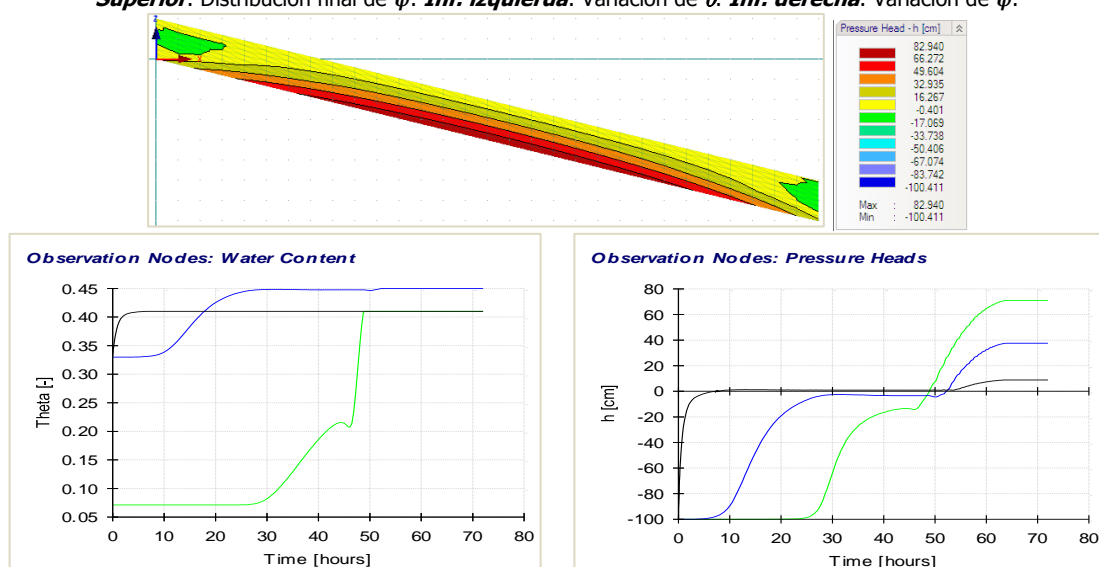
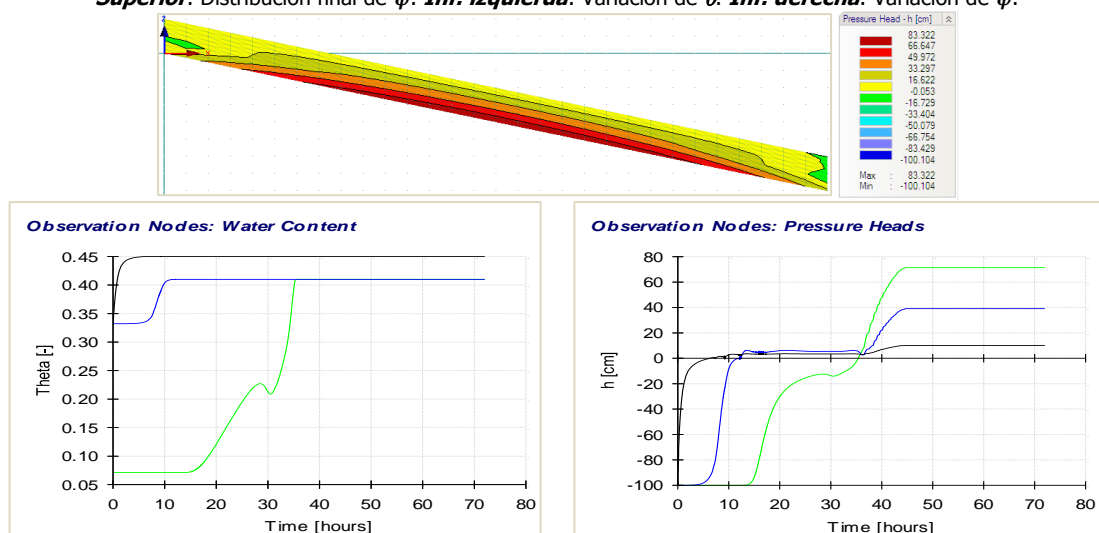
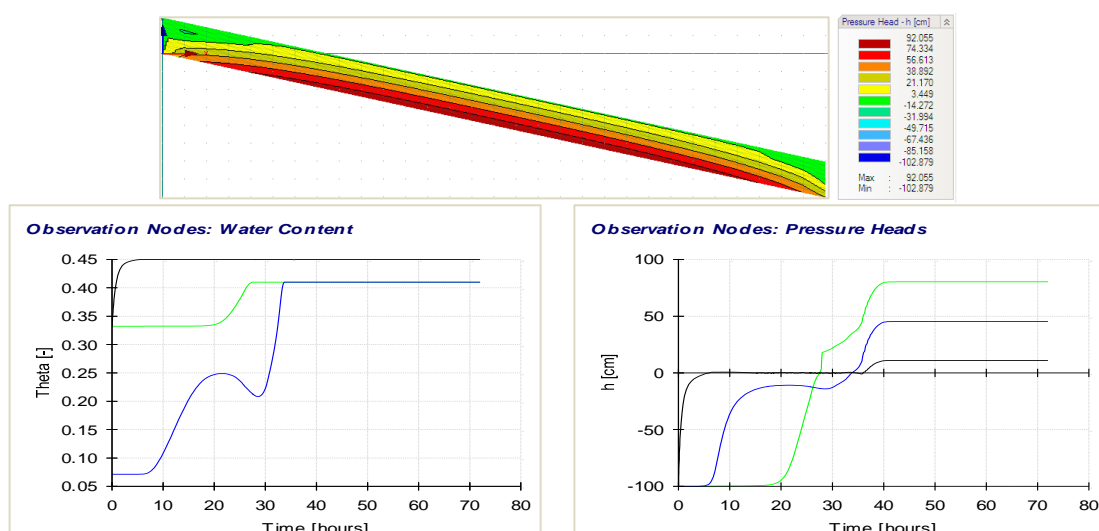


Figura AM 136. Valores para la **combinación 2** de texturas, espesor de **1,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .



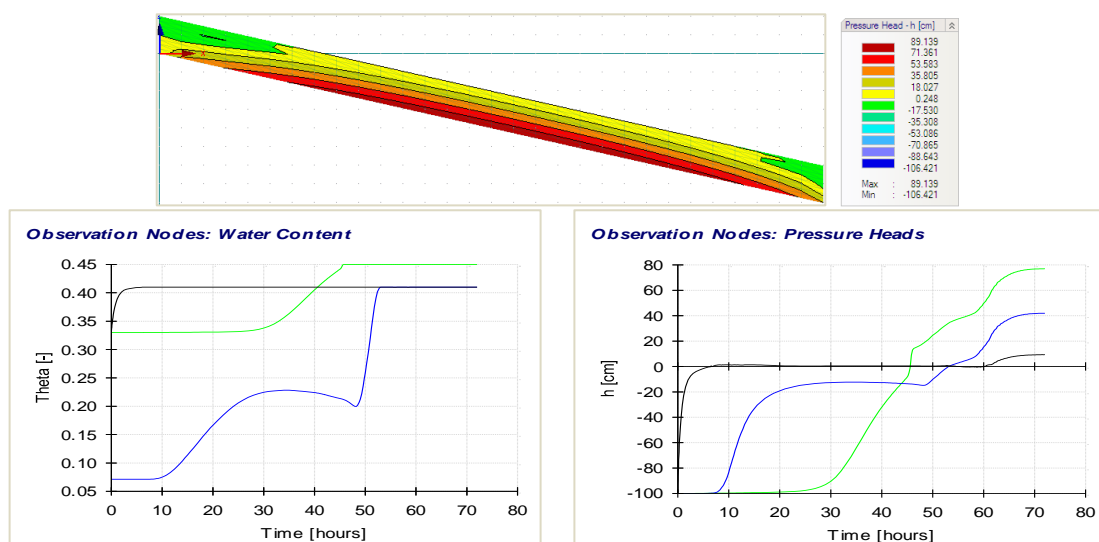


Figura AM 140. Valores para la combinación 6 de texturas, espesor de 1,0 m.
Superior: Distribución final de ψ . *Inf. izquierda:* Variación de θ . *Inf. derecha:* Variación de ψ .

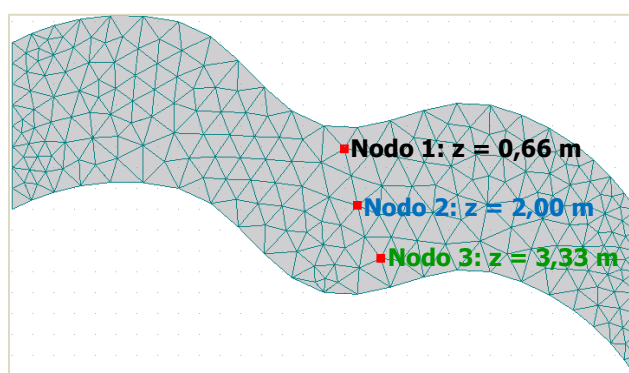


Figura AM 141. Ubicación de 3 nodos de control, centro del suelo, espesor: 4,0 m. Forma curva inclinada 15° .

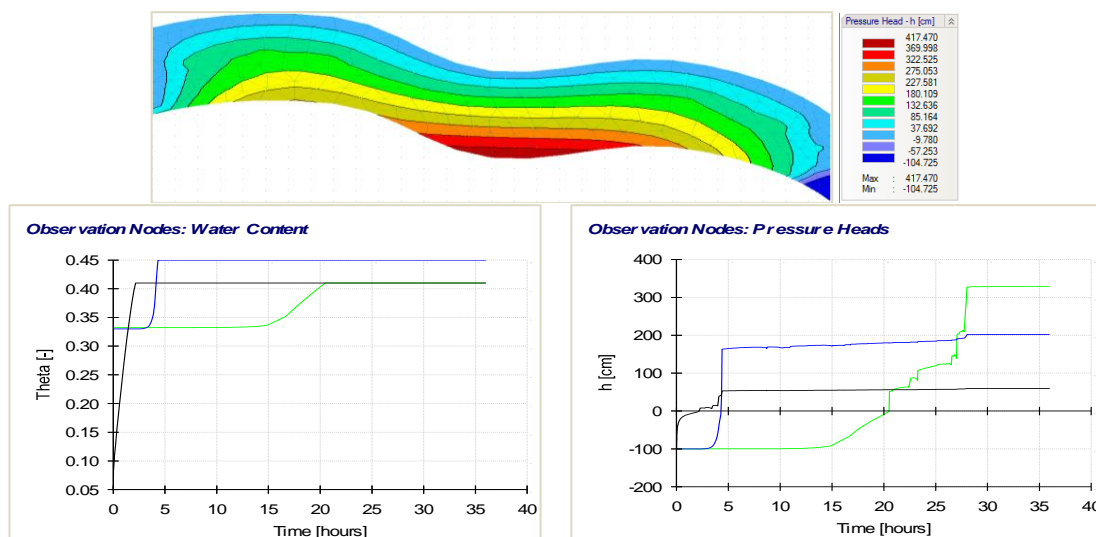
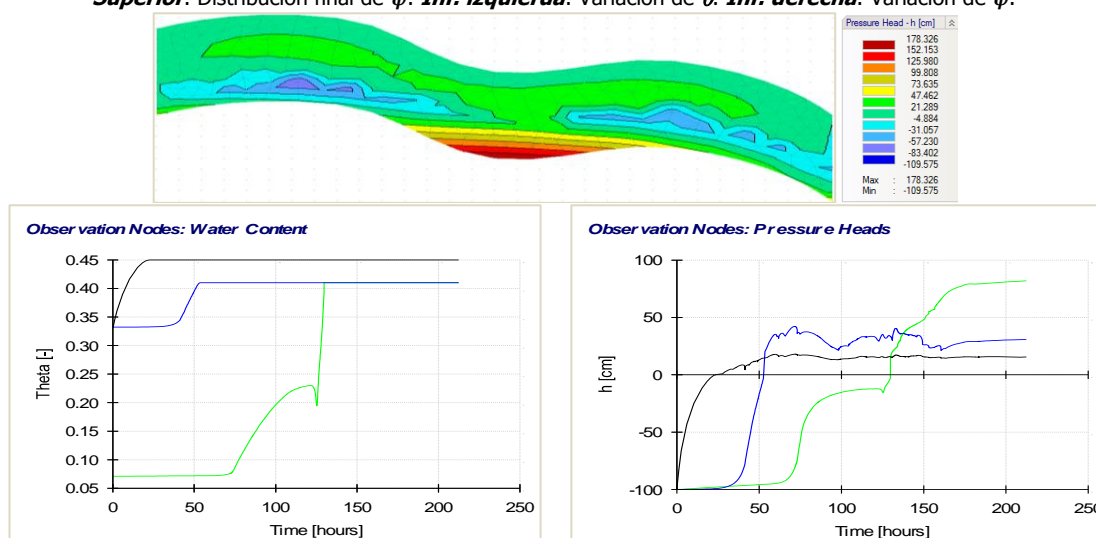
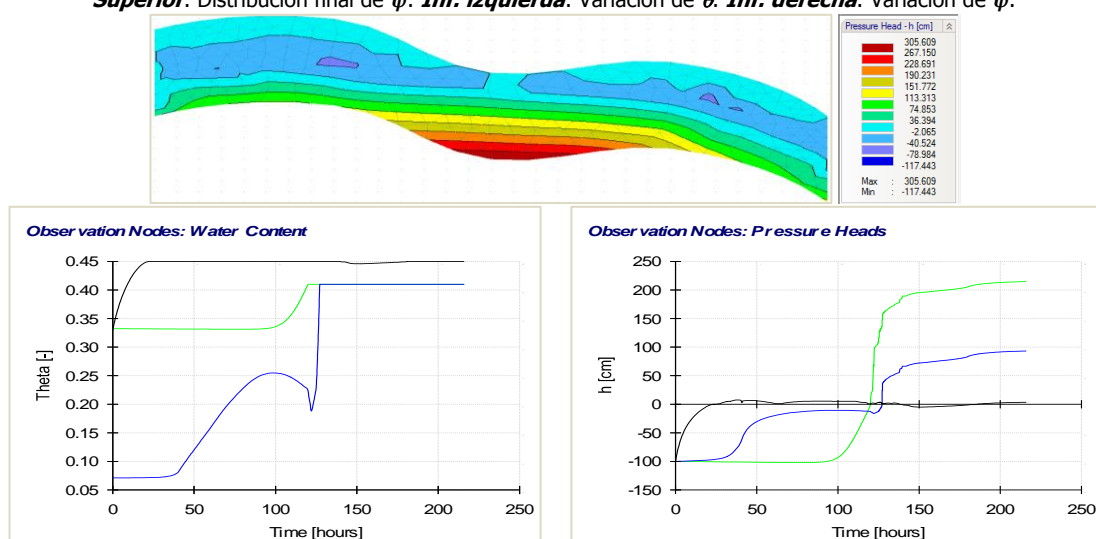
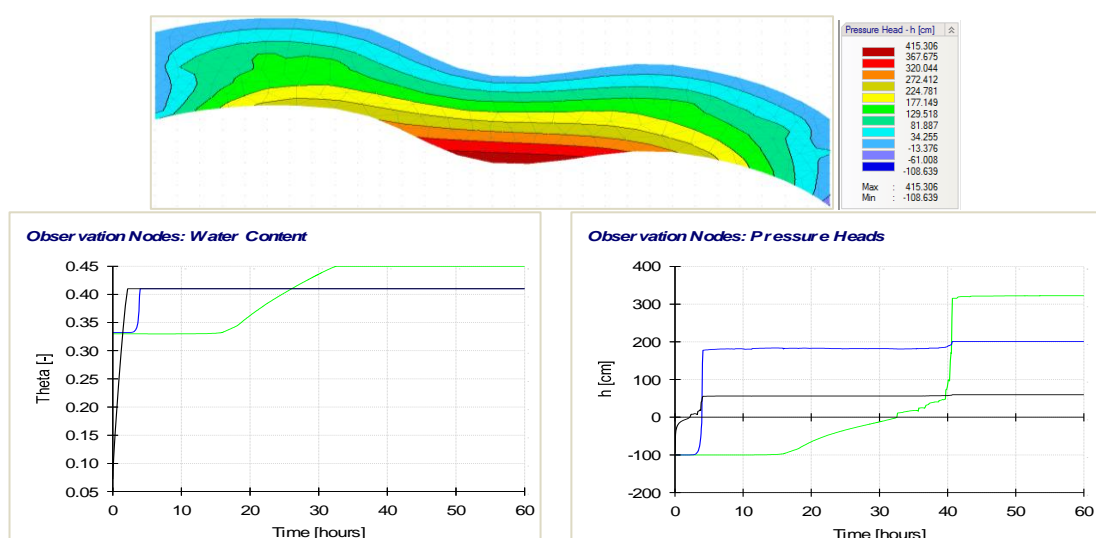


Figura AM 142. Valores para la combinación 1 de texturas, espesor de 4,0 m.
Superior: Distribución final de ψ . *Inf. izquierda:* Variación de θ . *Inf. derecha:* Variación de ψ .



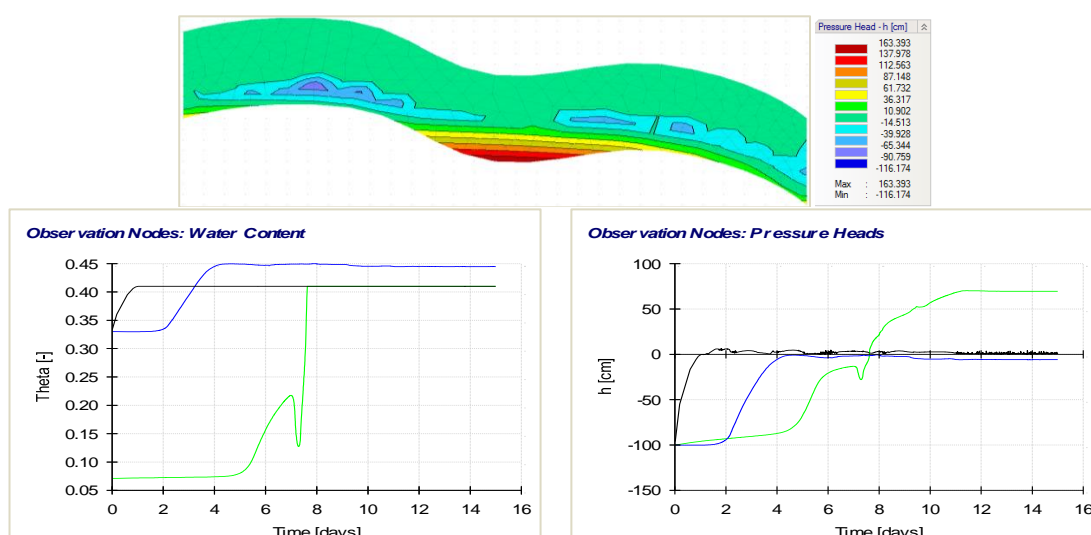


Figura AM 146. Valores para la combinación 5 de texturas, espesor de 4,0 m. *Superior:* Distribución final de ψ . *Inf. izquierda:* Variación de θ . *Inf. derecha:* Variación de ψ .

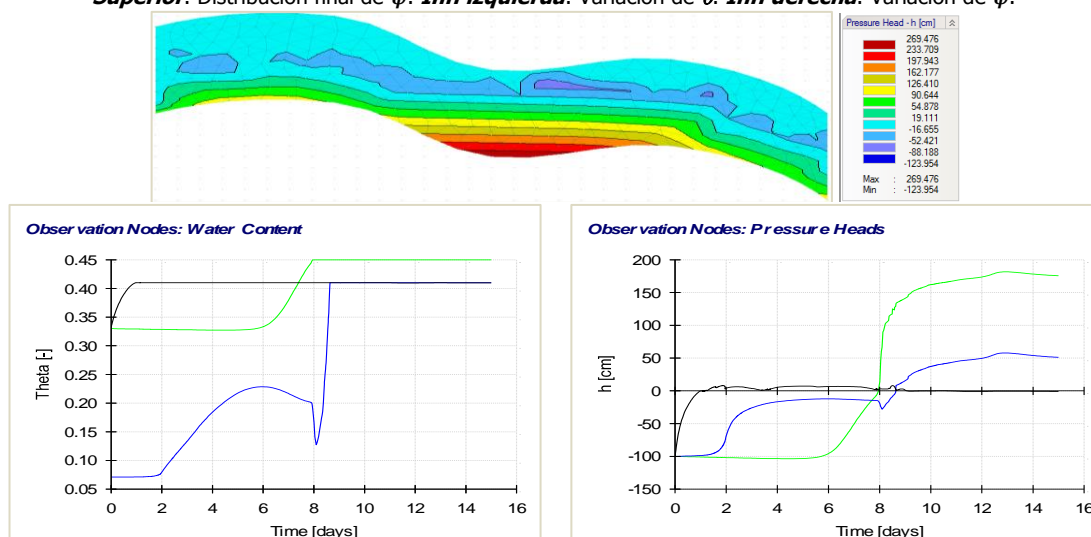


Figura AM 147. Valores para la combinación 6 de texturas, espesor de 4,0 m. *Superior:* Distribución final de ψ . *Inf. izquierda:* Variación de θ . *Inf. derecha:* Variación de ψ .

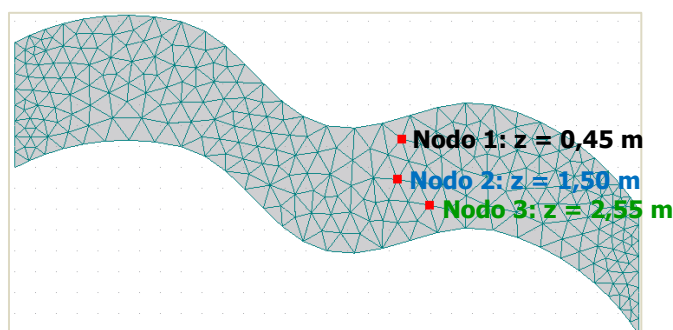


Figura AM 148. Ubicación de 3 nodos de control, centro del suelo, espesor: 3,0 m. Forma curva inclinada 15°.

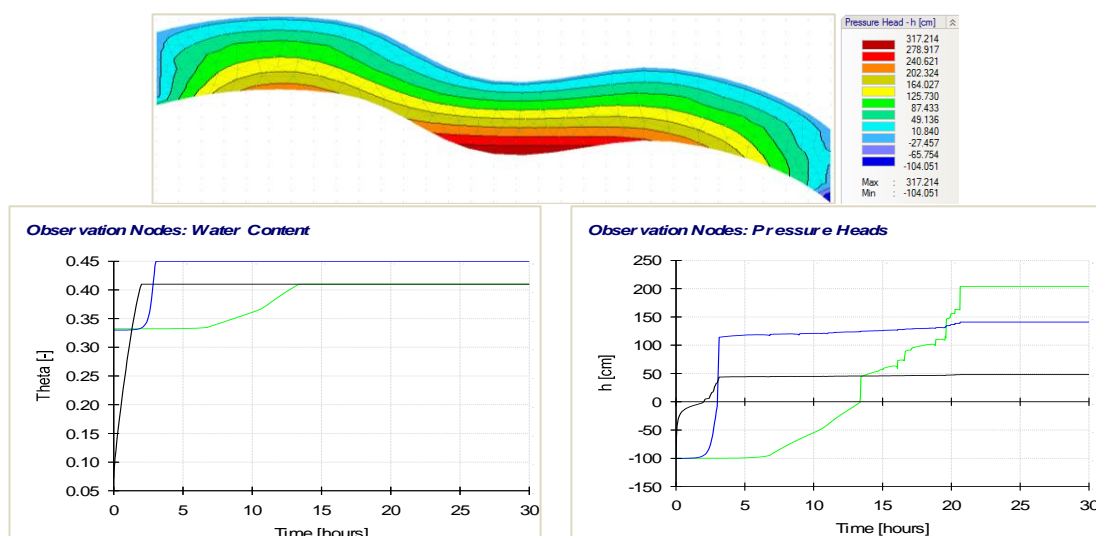


Figura AM 149. Valores para la **combinación 1** de texturas, espesor de **3,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

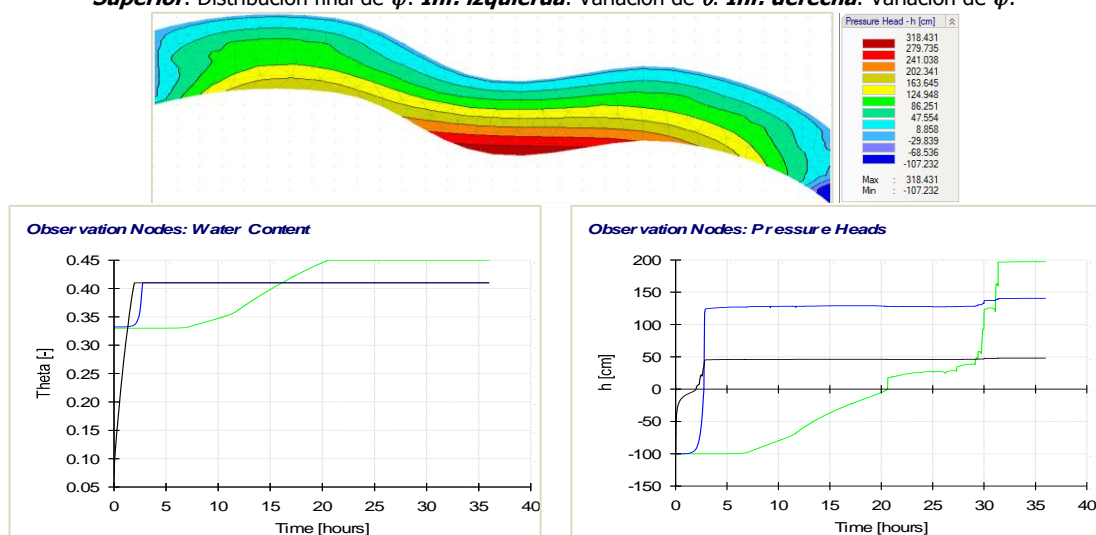


Figura AM 150. Valores para la **combinación 2** de texturas, espesor de **3,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

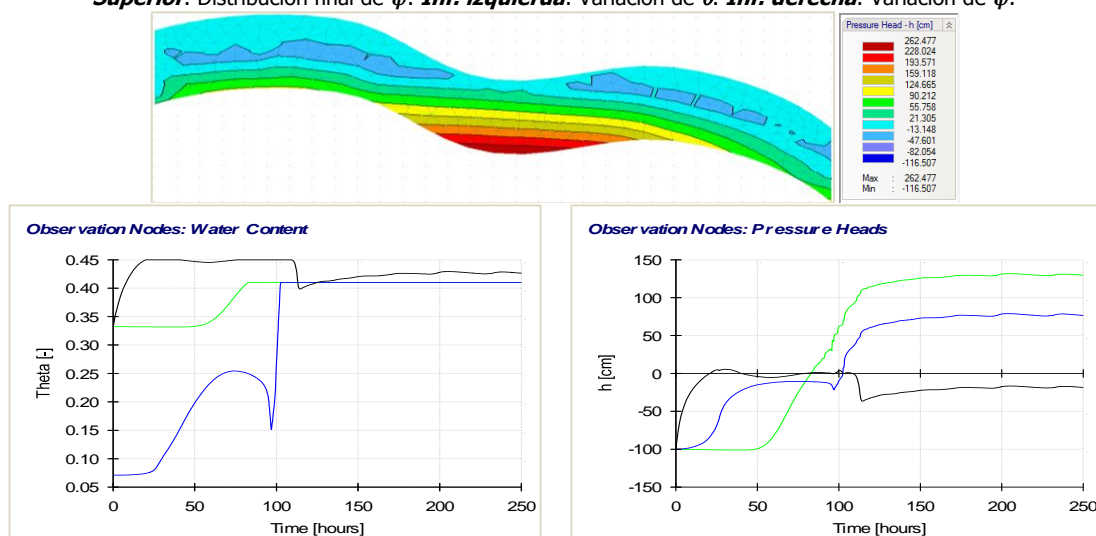
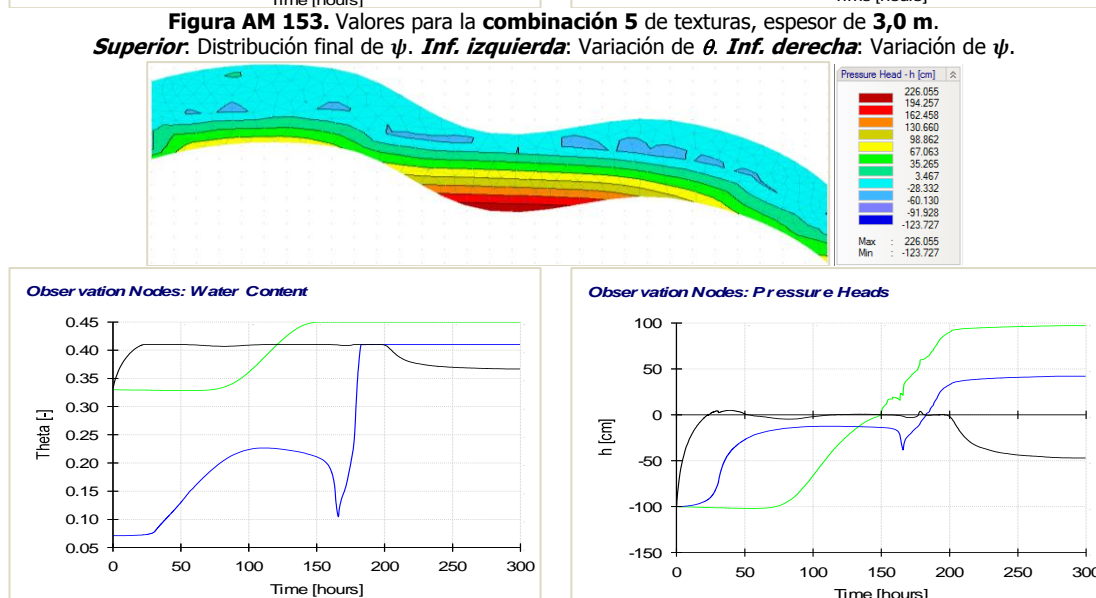
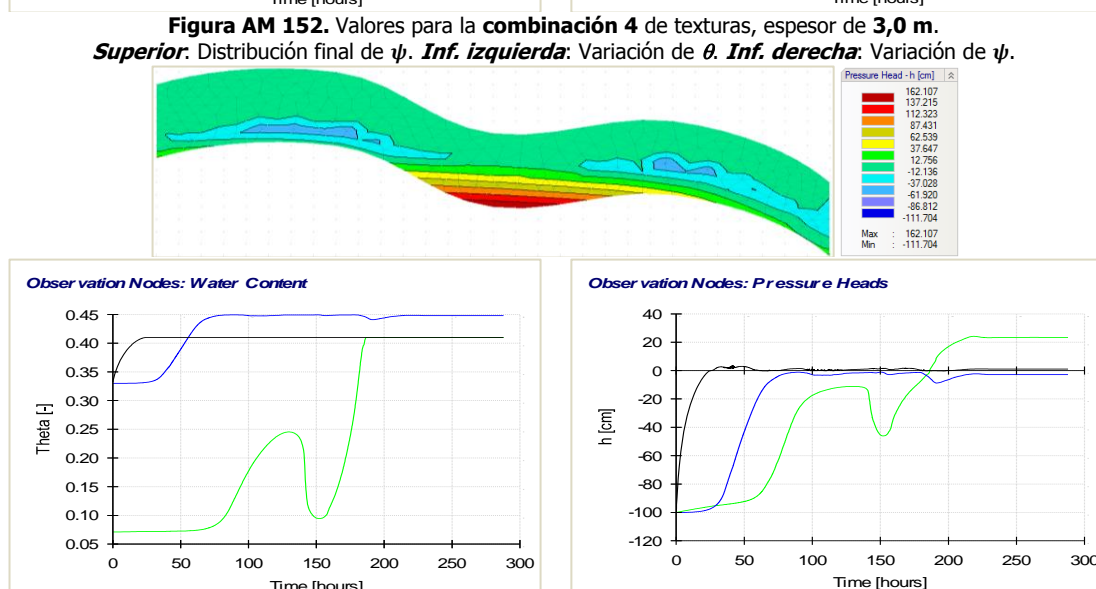
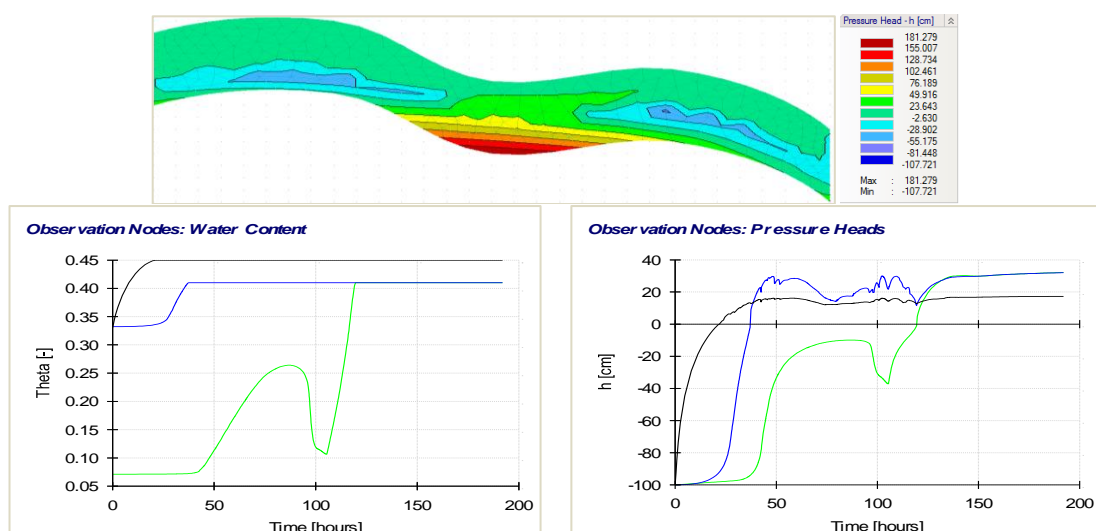


Figura AM 151. Valores para la **combinación 3** de texturas, espesor de **3,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .



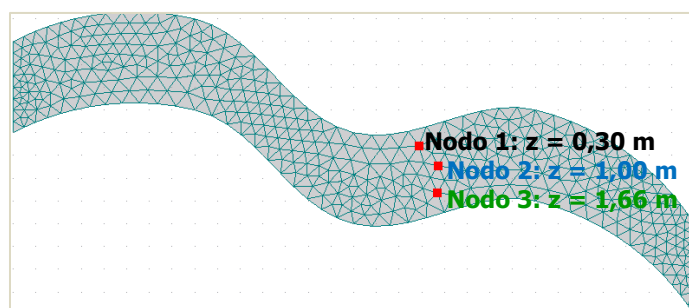


Figura AM 155. Ubicación de 3 nodos de control, centro del suelo, espesor: **2,0 m**. Forma curva inclinada **15°**.

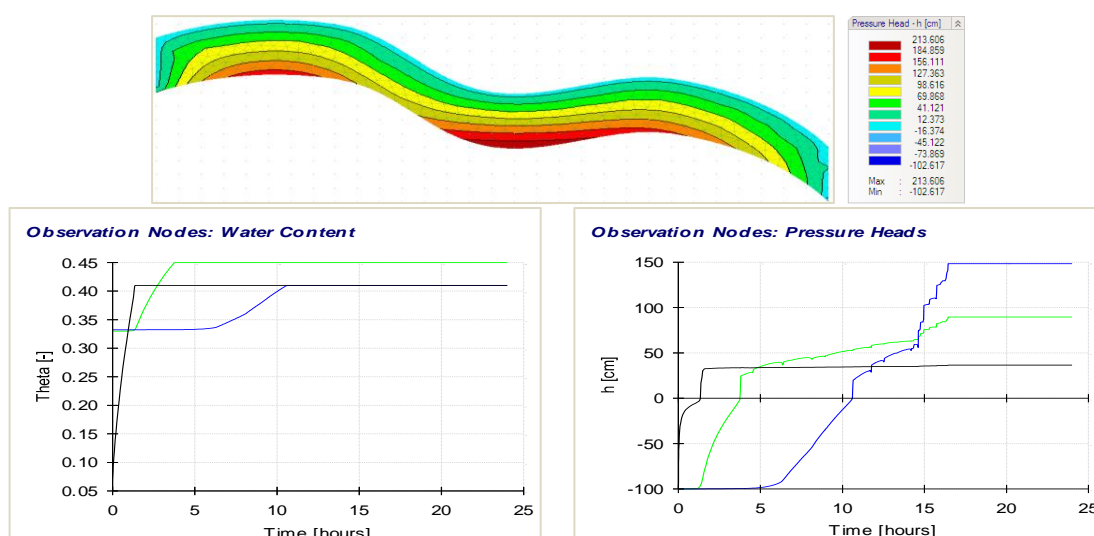


Figura AM 156. Valores para la **combinación 1** de texturas, espesor de **2,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

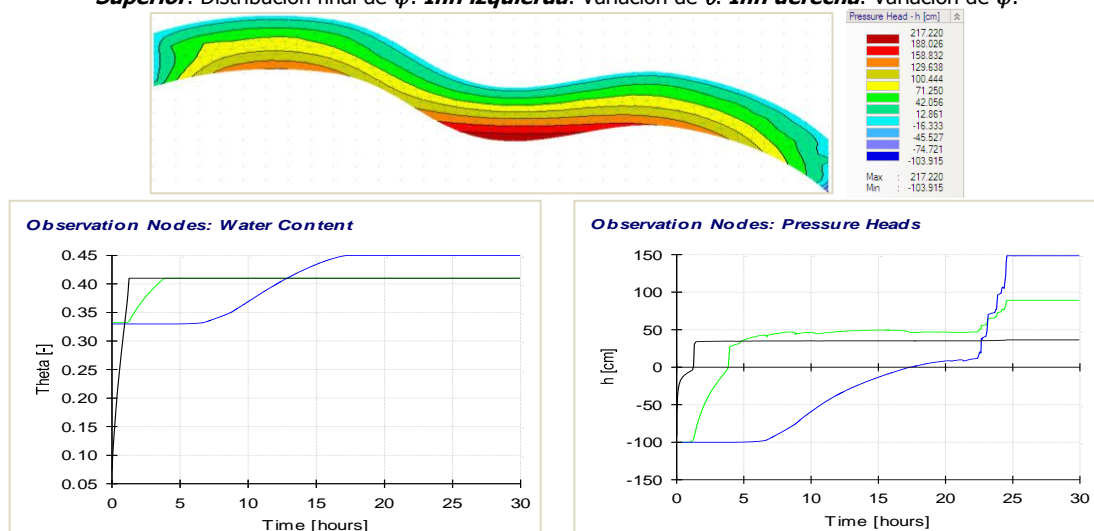
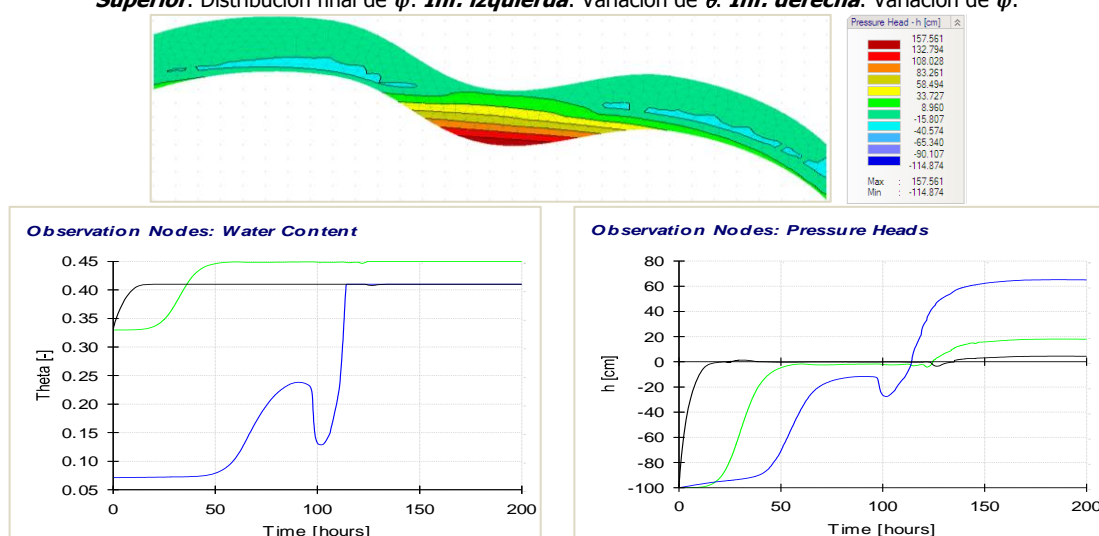
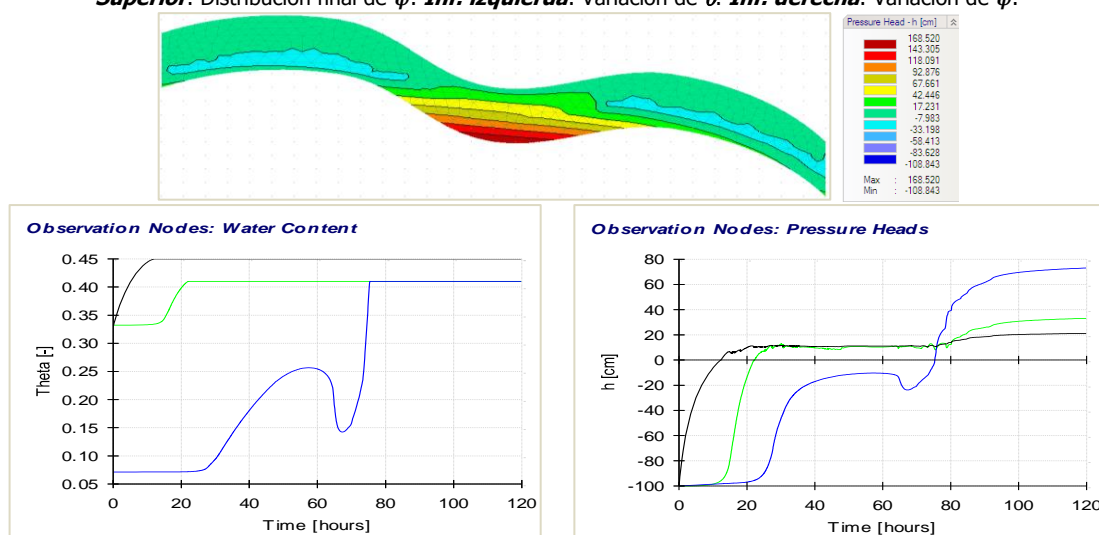
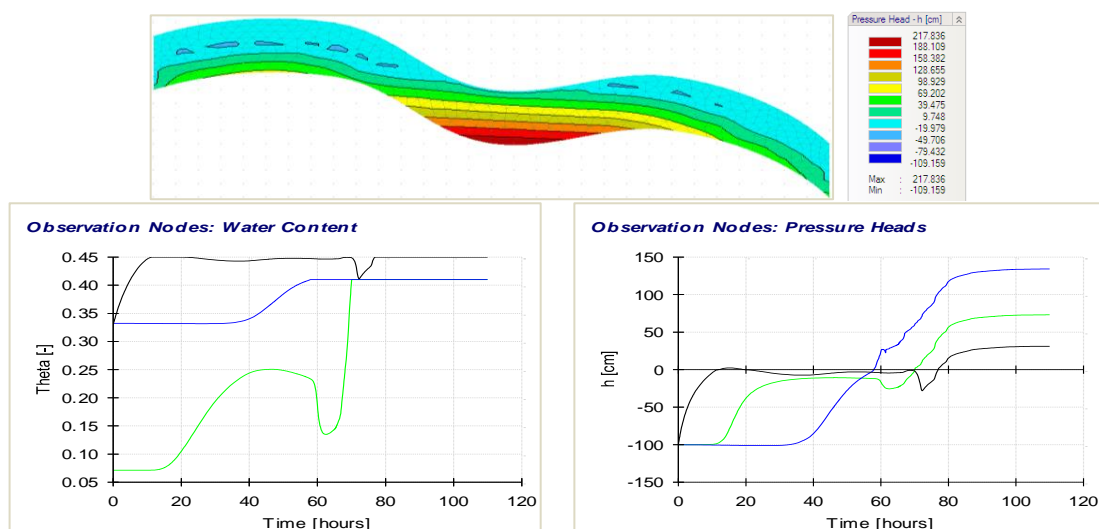


Figura AM 157. Valores para la **combinación 2** de texturas, espesor de **2,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .



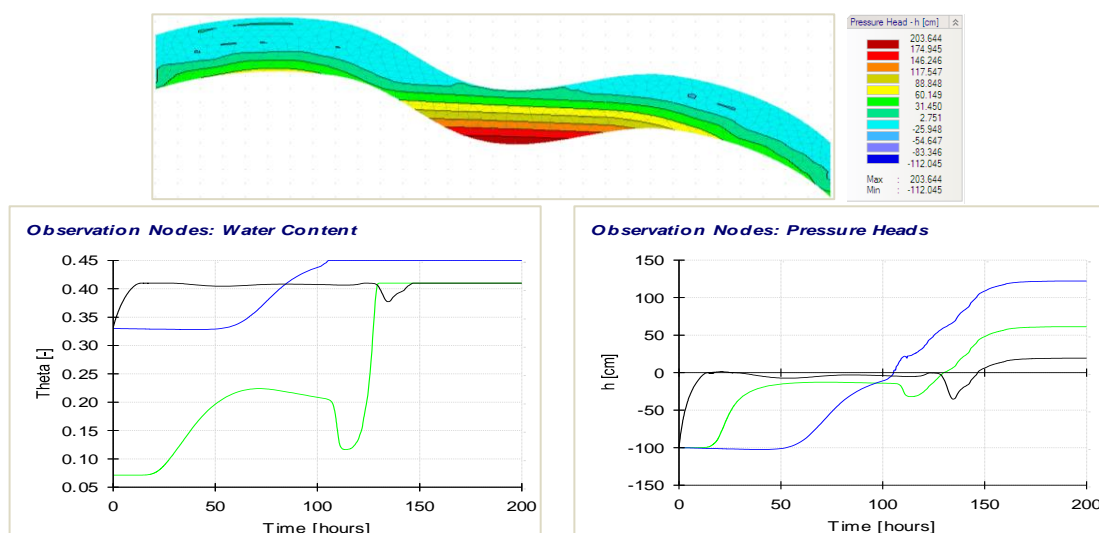


Figura AM 161. Valores para la **combinación 6** de texturas, espesor de **2,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

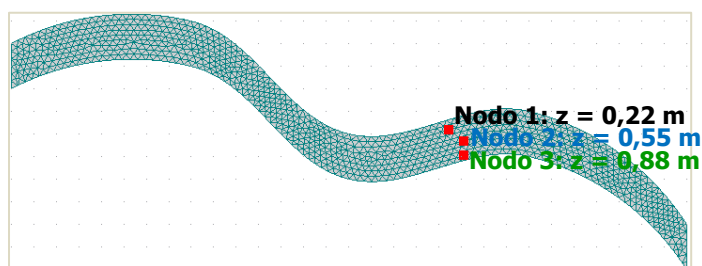


Figura AM 162. Ubicación de 3 nodos de control, centro del suelo, espesor: **1,0 m**. Forma curva inclinada **15°**.

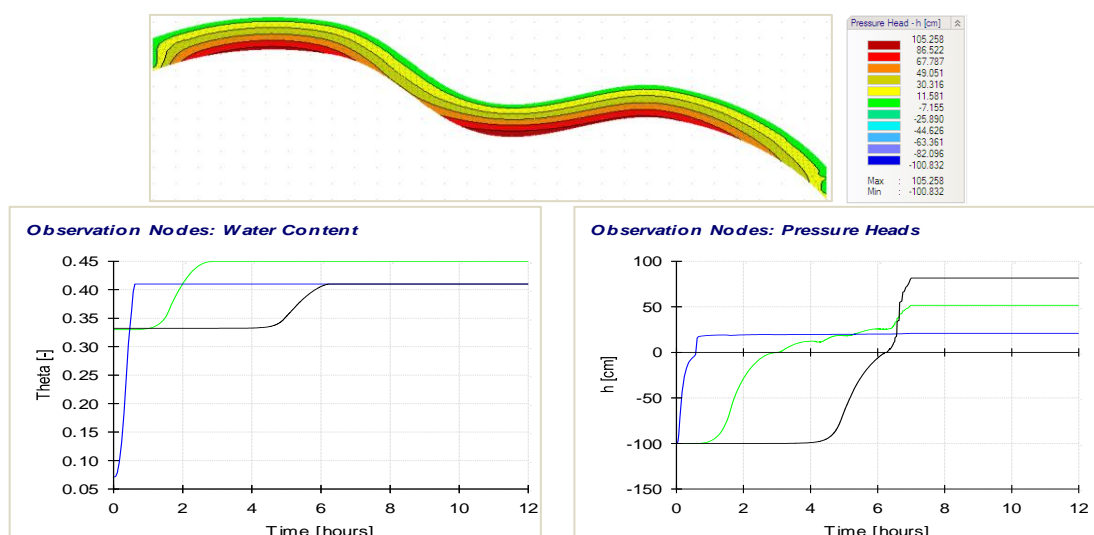


Figura AM 163. Valores para la **combinación 1** de texturas, espesor de **1,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

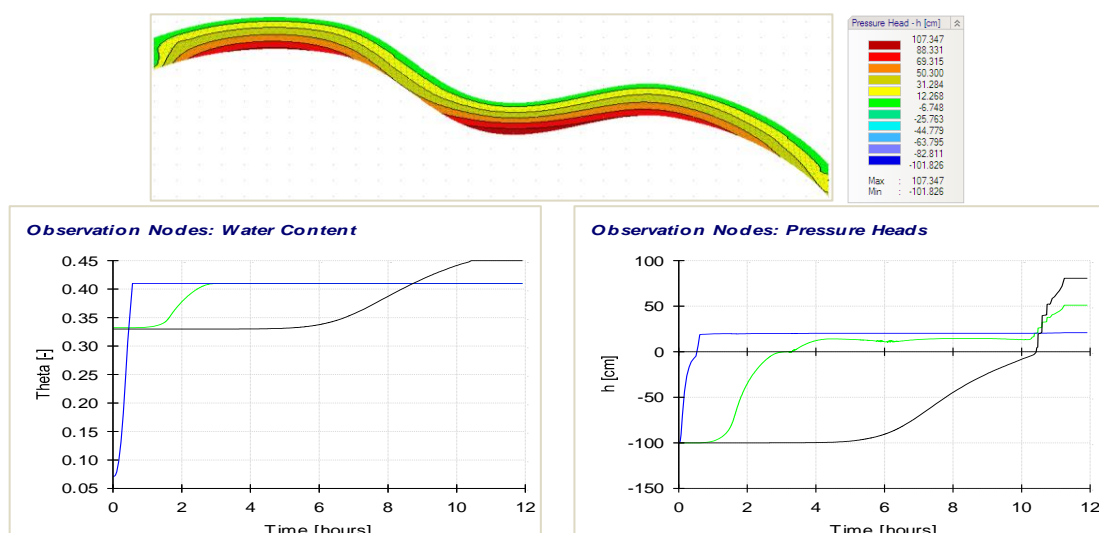


Figura AM 164. Valores para la **combinación 2** de texturas, espesor de **1,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

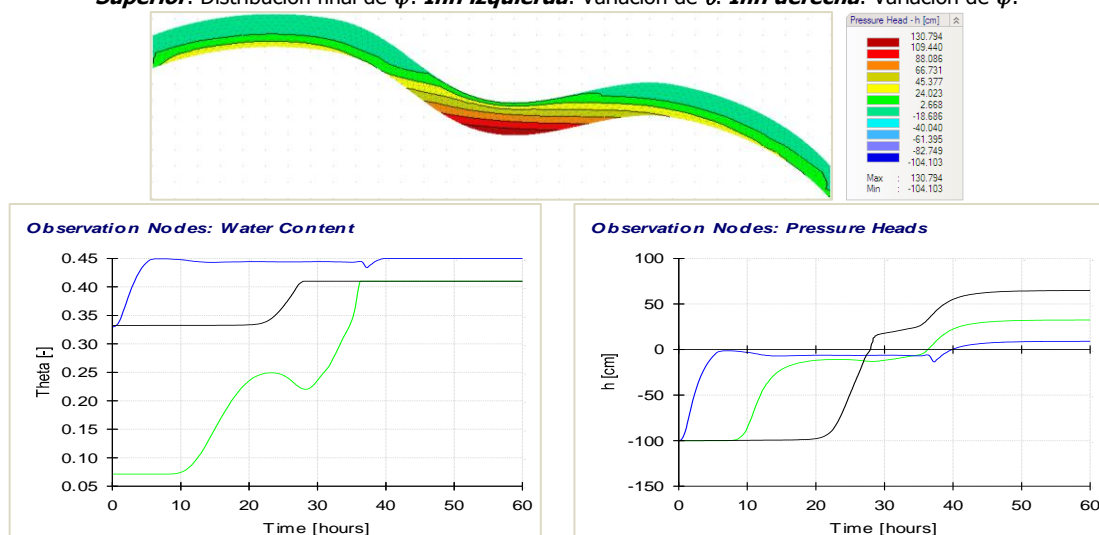


Figura AM 165. Valores para la **combinación 3** de texturas, espesor de **1,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

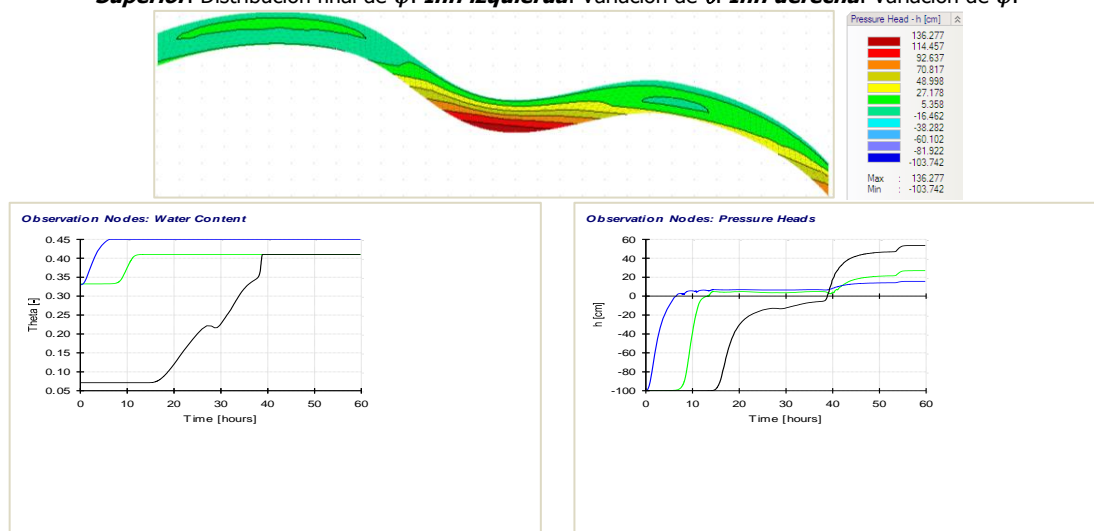


Figura AM 166. Valores para la **combinación 4** de texturas, espesor de **1,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

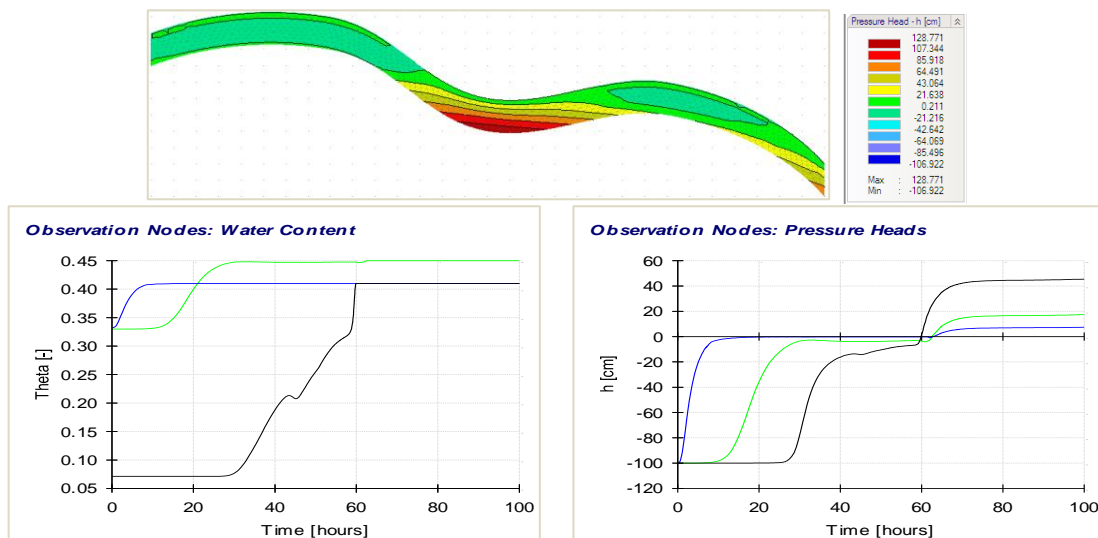


Figura AM 167. Valores para la **combinación 5** de texturas, espesor de **1,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

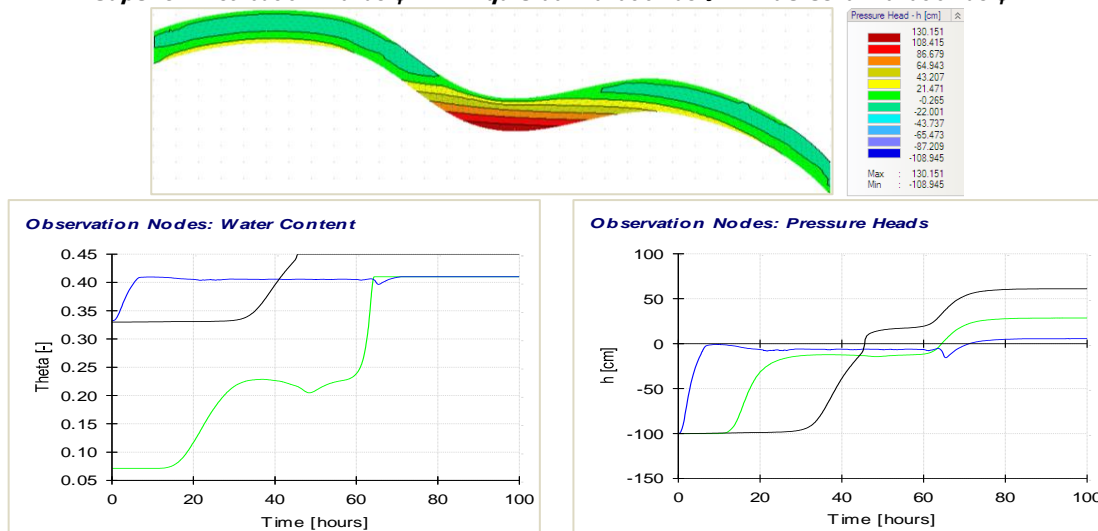


Figura AM 168. Valores para la **combinación 6** de texturas, espesor de **1,0 m**.
Superior: Distribución final de ψ . **Inf. izquierda:** Variación de θ . **Inf. derecha:** Variación de ψ .

3. APÉNDICE NUMERAL 3.2.3.1 "Modelación en 2-D usando los umbrales de lluvia de Guzzetti"

Las siguientes figuras representan las cabezas de presión " ψ " alcanzadas para 17 combinaciones intensidad **I** – duración **D** de lluvia, usando los umbrales de Guzzetti. Se han realizado simulaciones con 3 condiciones diferentes de θ , para 3 combinaciones de suelos diferentes tomando un espesor de 4,0 m; en total se realizaron 153 modelaciones.

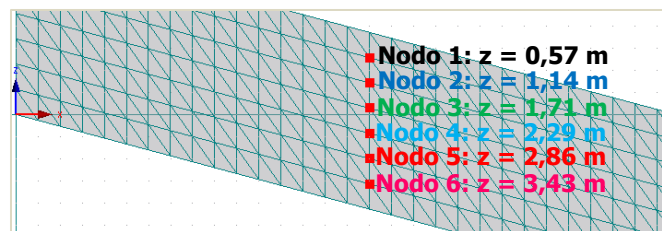


Figura AM 169. Ubicación de 6 nodos de control, centro del suelo, espesor: **4,0 m**. Suelo **Franco Limoso**.

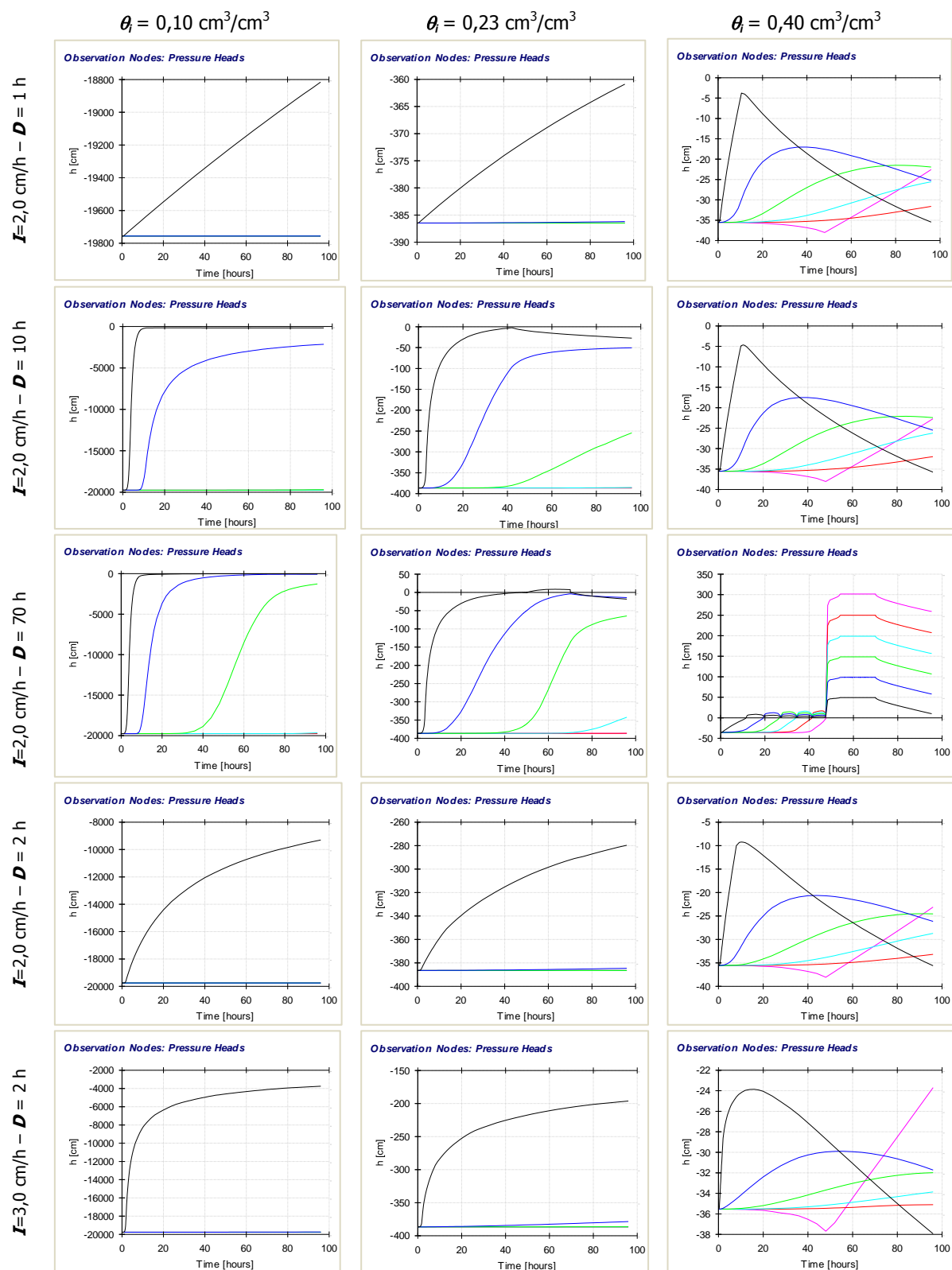


Figura AM 170. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones 1 a 5 de Intensidad – Duración según la Tabla 29, para un suelo de textura: **Franco Limoso**.

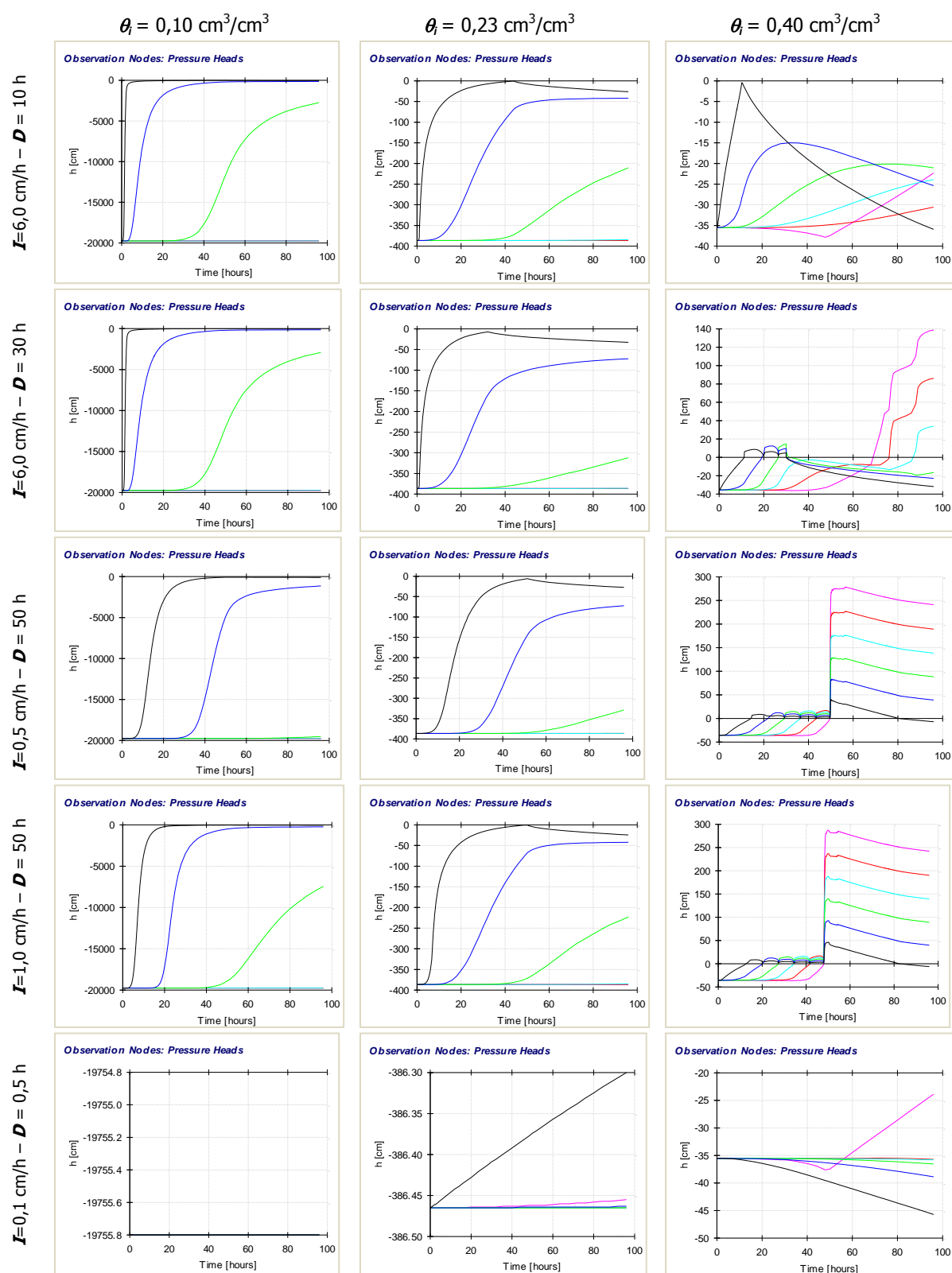


Figura AM 171. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones 6 a 10 de Intensidad – Duración según la Tabla 29, para un suelo de textura: **Franco Limoso**.

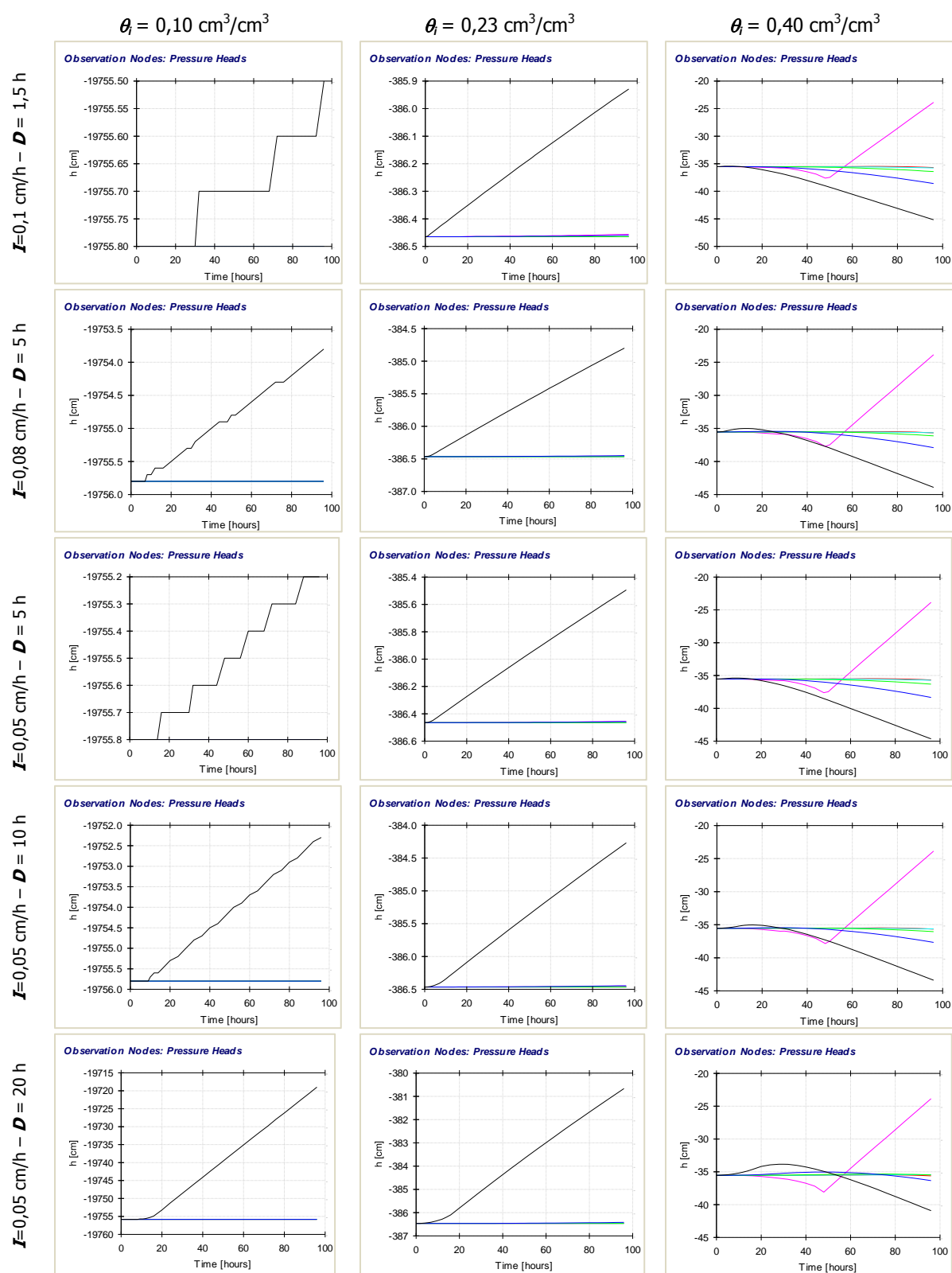


Figura AM 172. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones **11 a 15** de Intensidad – Duración según la Tabla 29, para un suelo de textura: **Franco Limoso**.

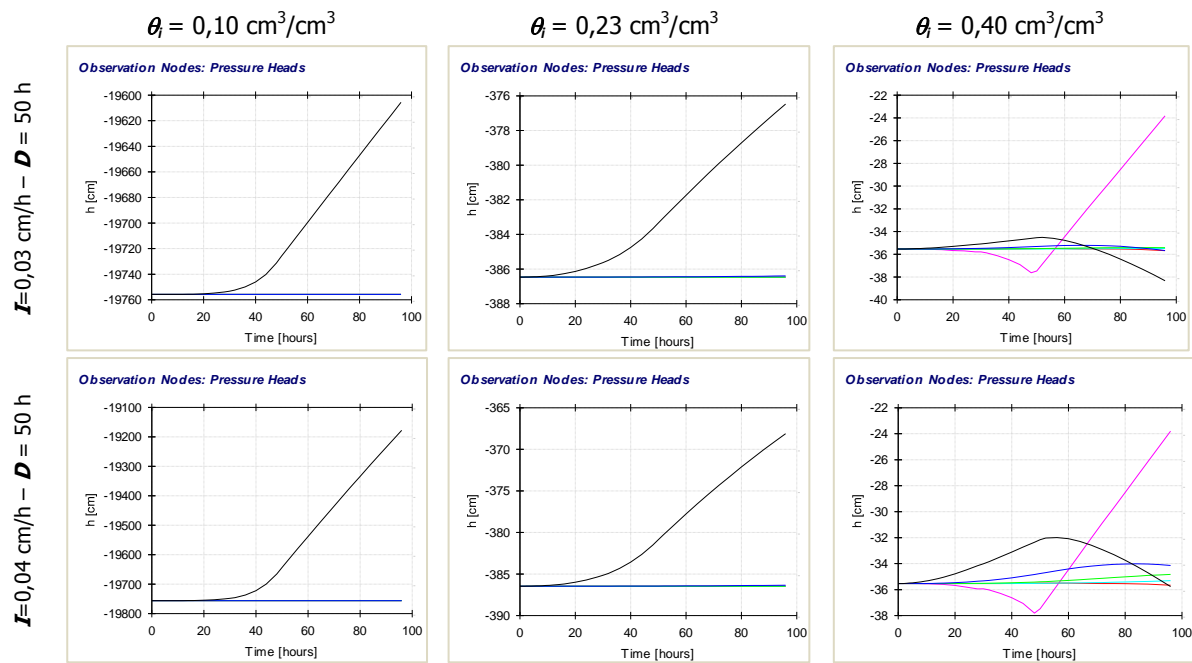


Figura AM 173. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones **16** y **17** de Intensidad – Duración según la Tabla 29, para un suelo de textura: **Franco Limoso**.

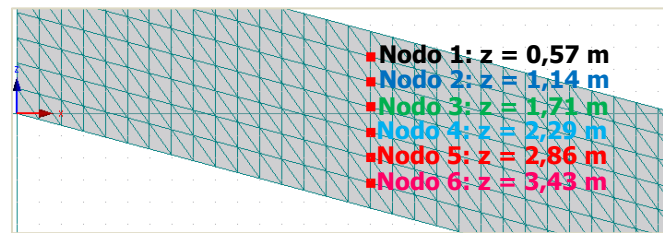


Figura AM 174. Ubicación de 6 nodos de control, centro del suelo, espesor: **4,0 m**. Mitad superior: **Areno francoso** / Mitad inferior: **Franco Arcilloso**.

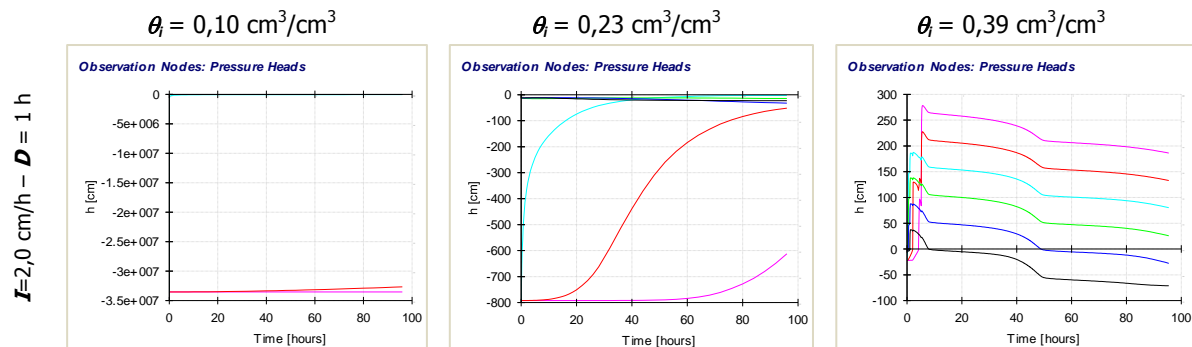


Figura AM 175. Valores de ψ alcanzados para la combinación **1** de Intensidad – Duración según la Tabla 29, para un suelo de textura: Mitad superior: **Areno francoso** / Mitad inferior: **Franco Arcilloso**

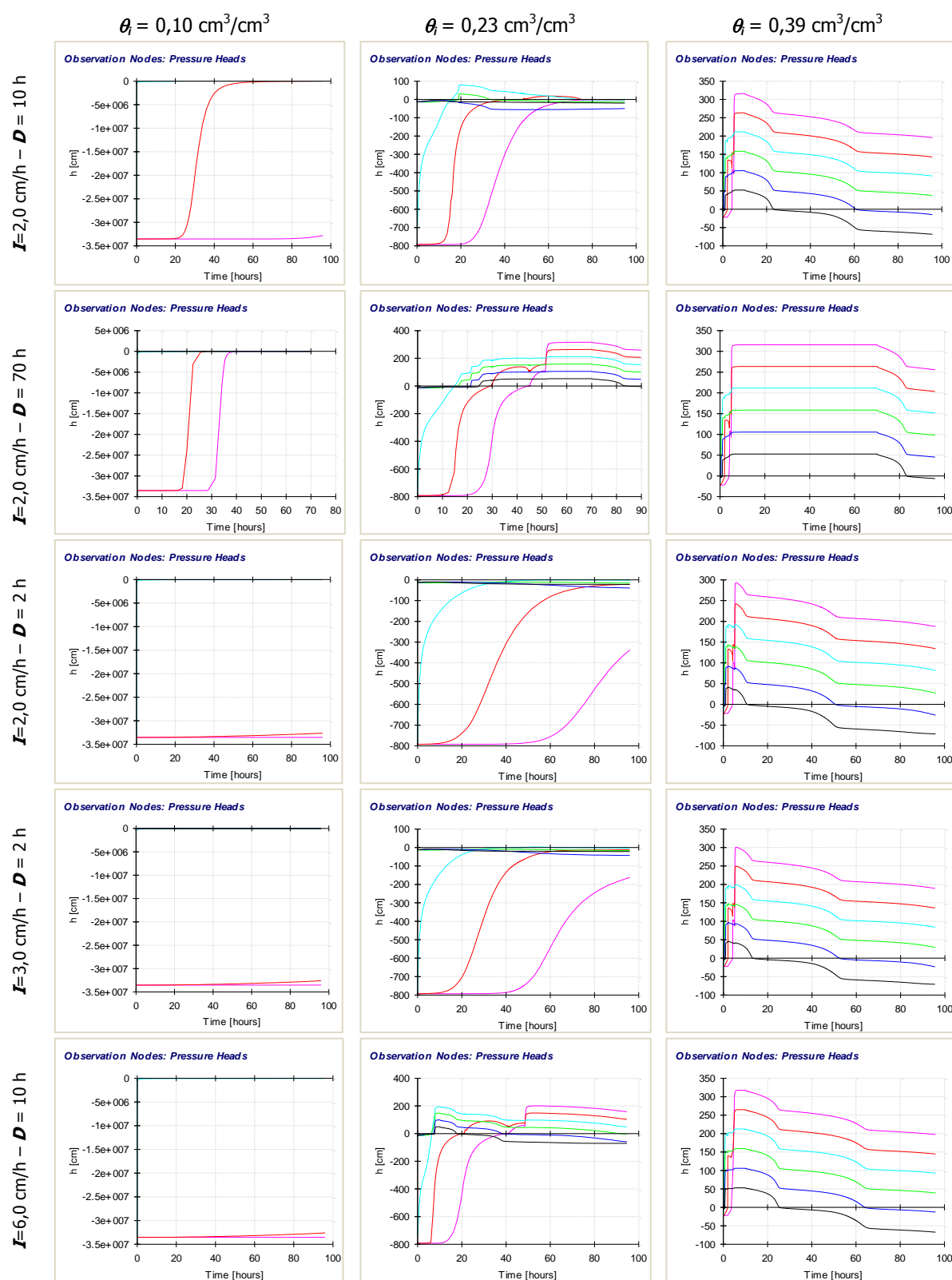


Figura AM 176. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones 2 a 6 de Intensidad – Duración según la Tabla 29, para un suelo de textura: Mitad superior: **Areno francoso** / Mitad inferior: **Franco Arcilloso**

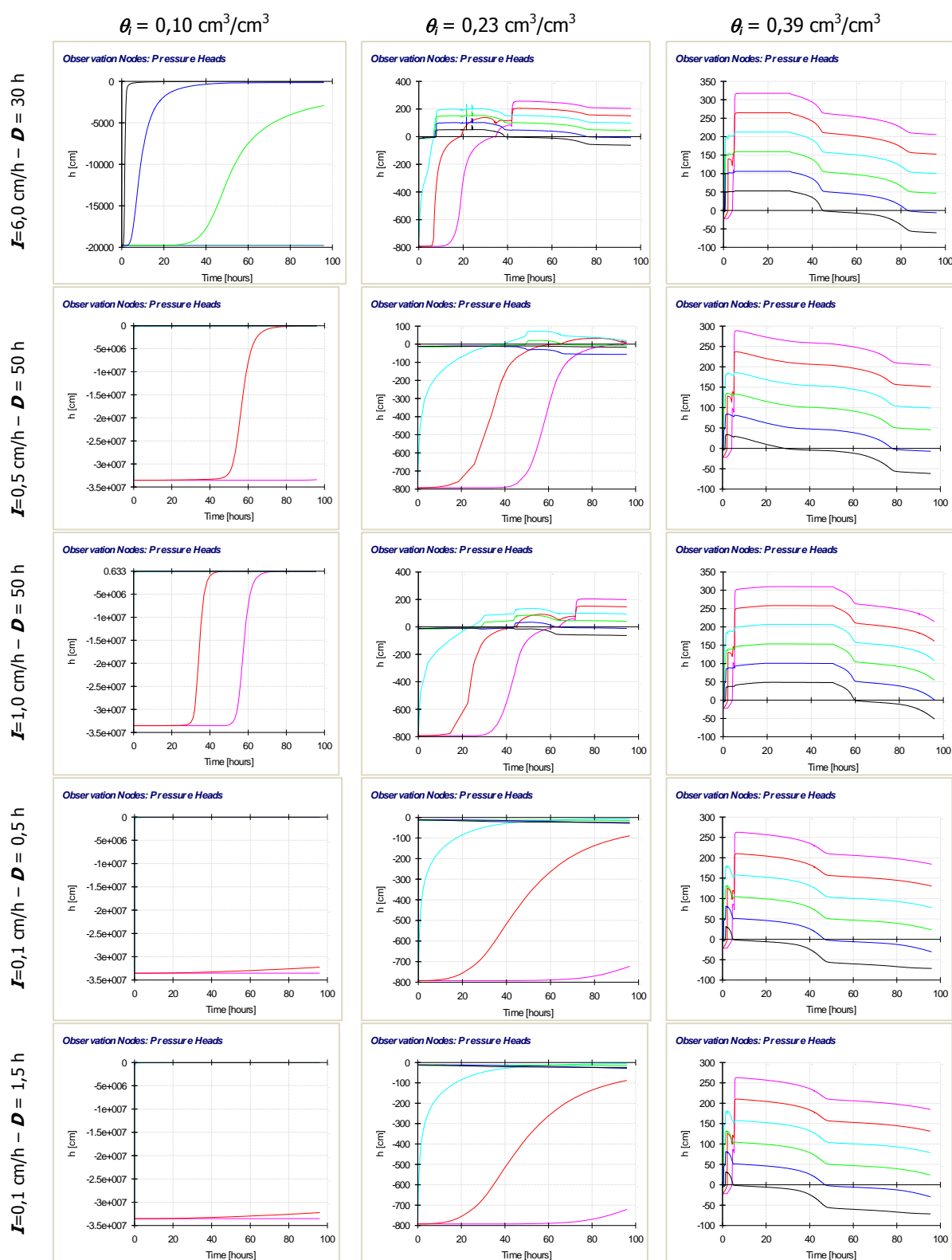


Figura AM 177. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones **7 a 11** de Intensidad – Duración según la Tabla 29, para un suelo de textura: Mitad superior: **Areno francoso** / Mitad inferior: **Franco Arcilloso**

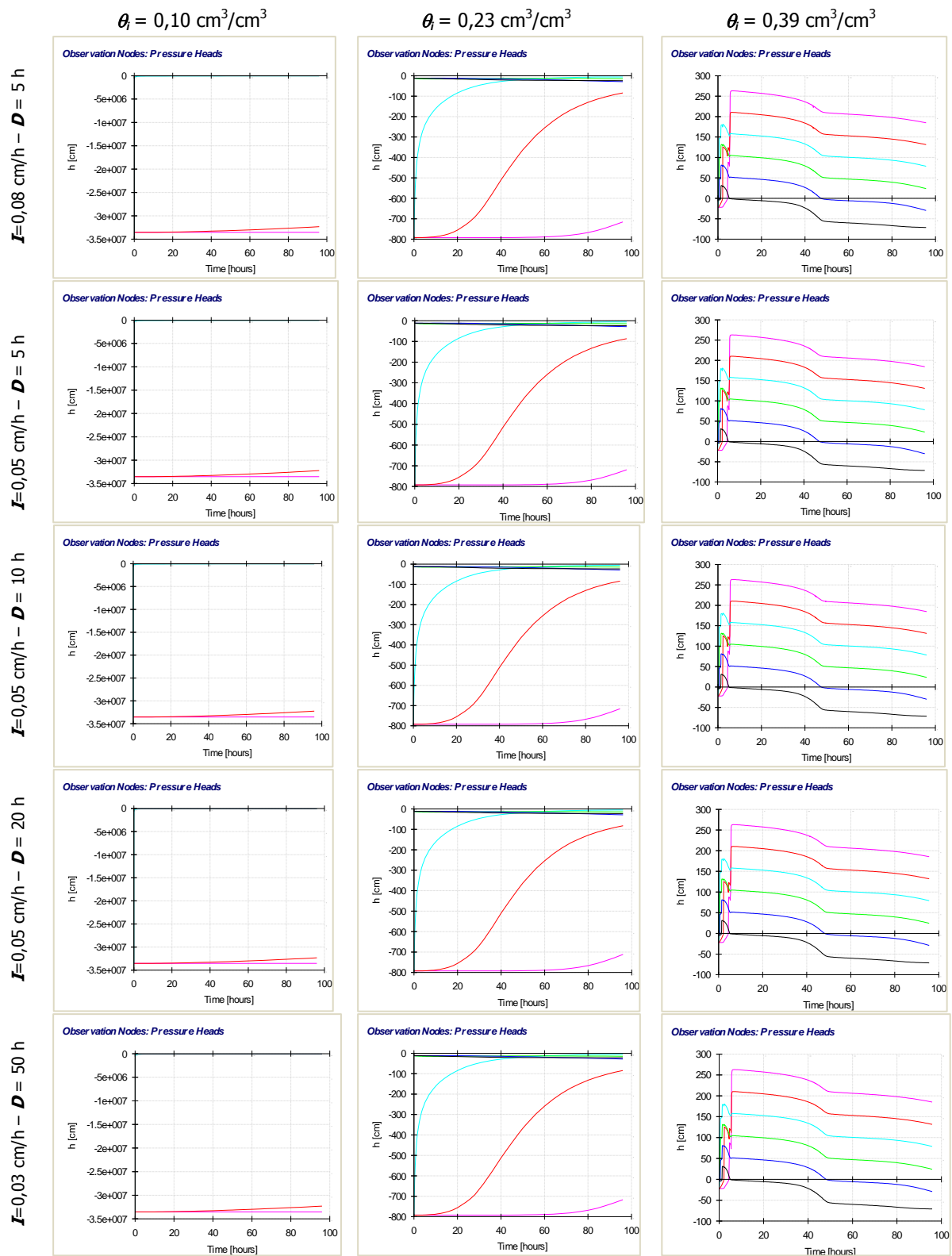


Figura AM 178. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones 12 a 16 de Intensidad – Duración según la Tabla 29, para un suelo de textura: Mitad superior: **Areno francoso** / Mitad inferior: **Franco Arcilloso**

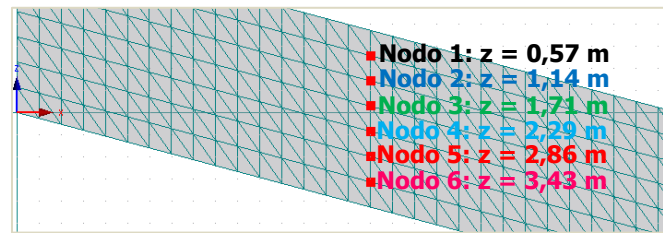
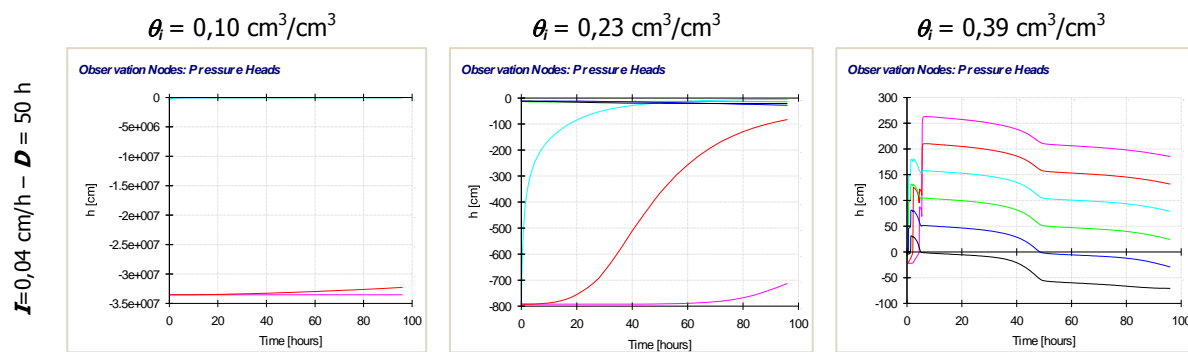
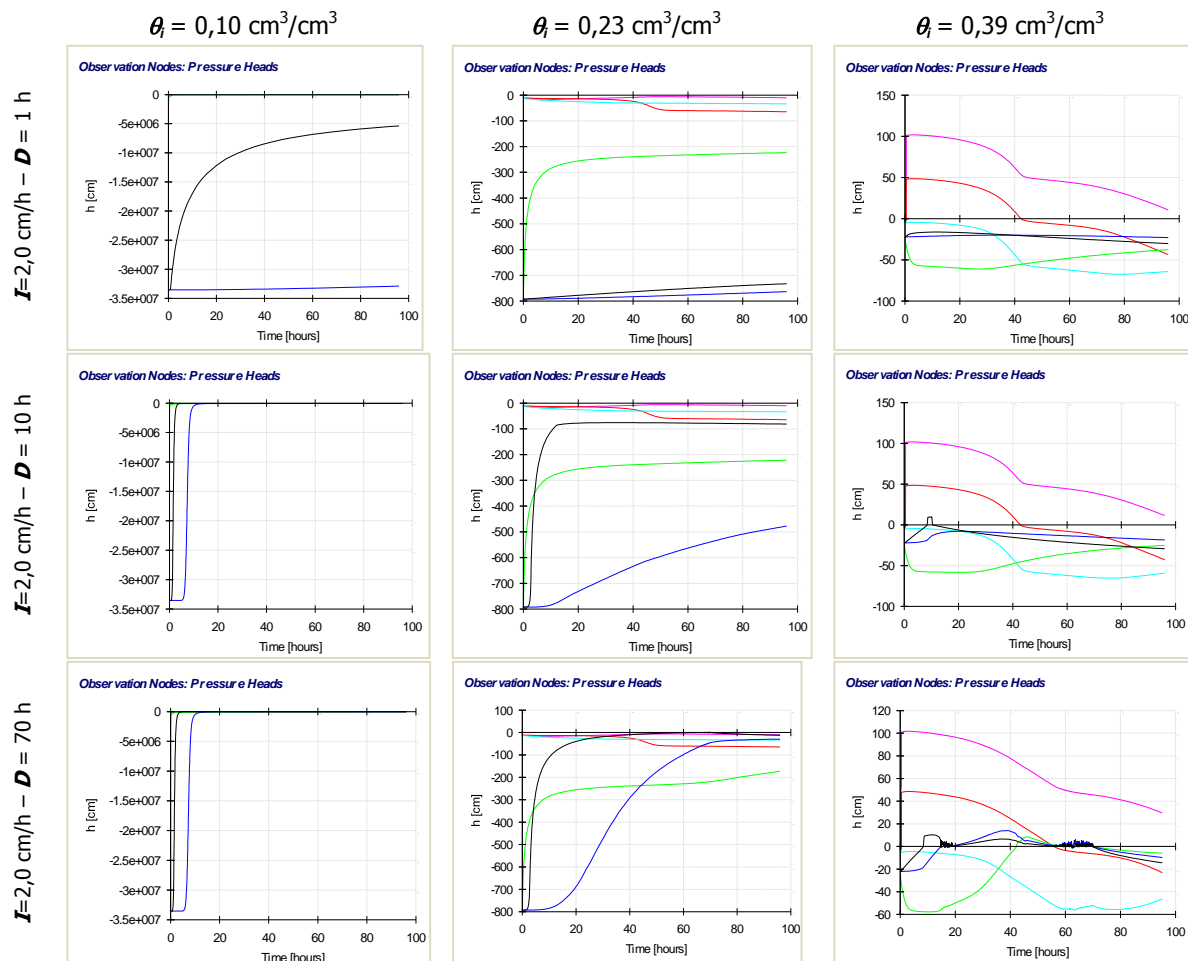


Figura AM 180. Ubicación de 6 nodos de control, centro del suelo, espesor: **4,0 m**. Mitad superior: **Franco Arcilloso** / Mitad inferior: **Areno francoso**.



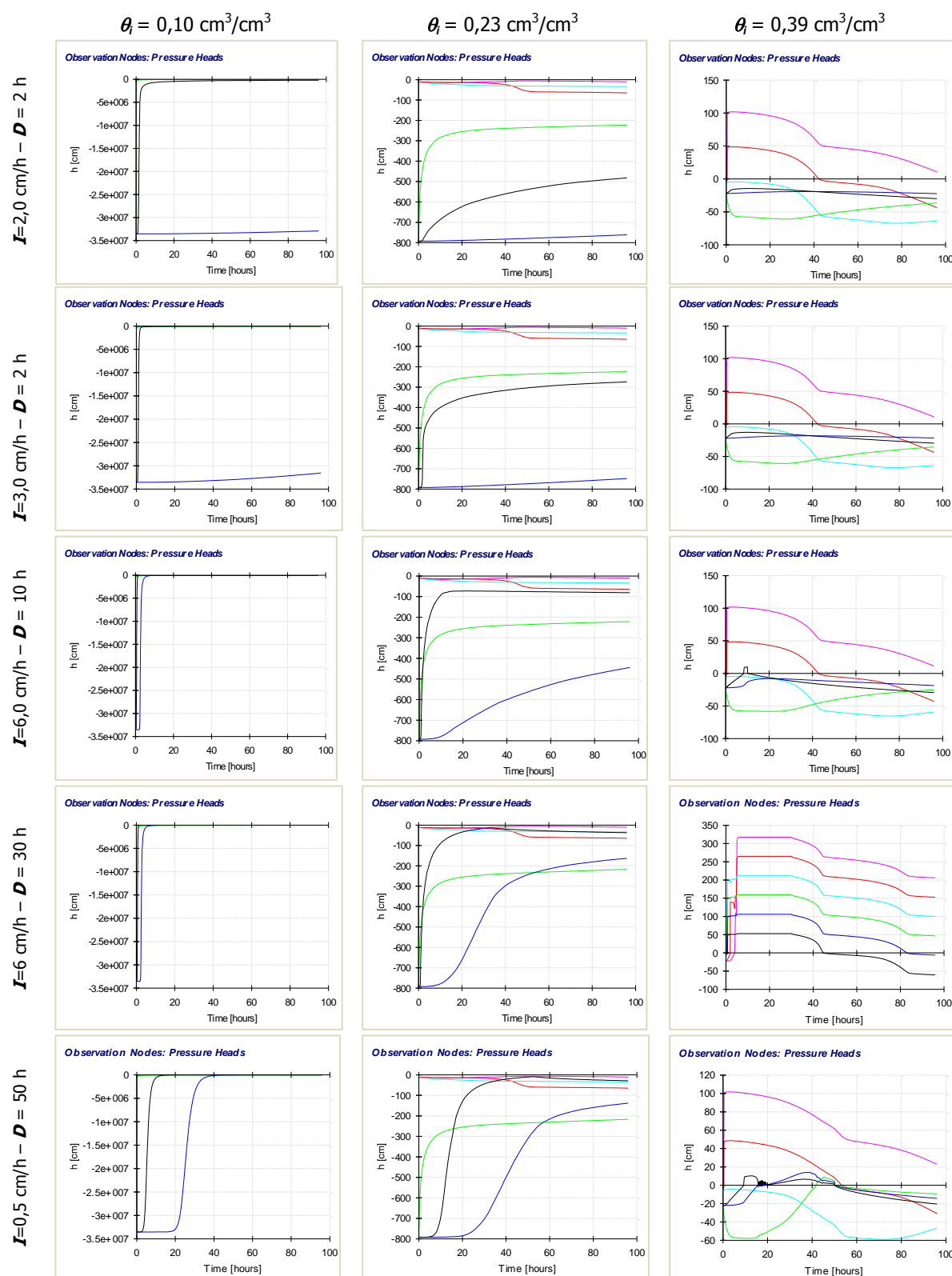


Figura AM 182. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones 4 a 8 de Intensidad – Duración según la Tabla 29, para un suelo de textura: Mitad superior: **Franco Arcilloso** / Mitad inferior: **Areno francoso**.

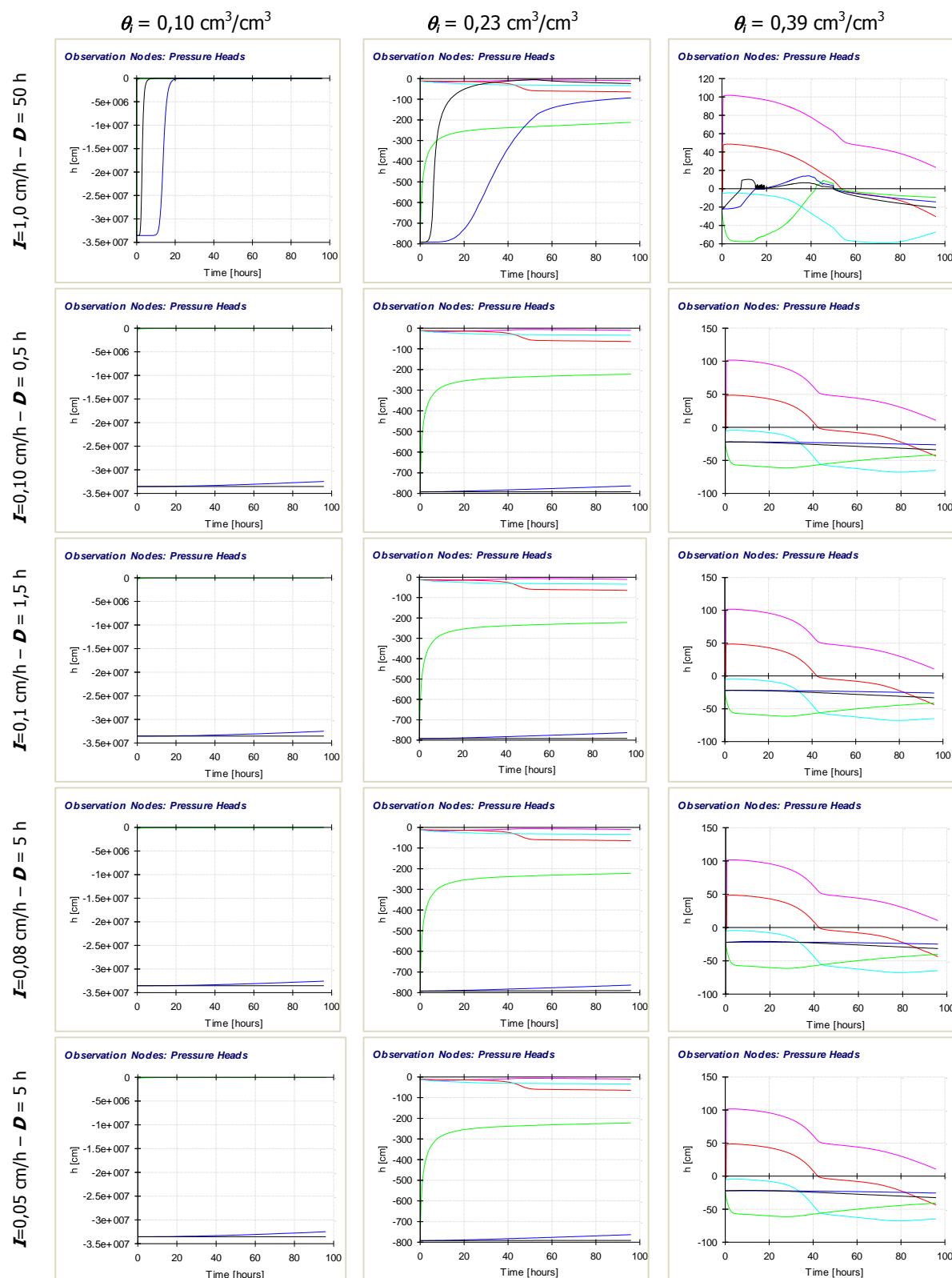


Figura AM 183. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones 9 a 13 de Intensidad – Duración según la Tabla 29, para un suelo de textura: Mitad superior: **Franco Arcilloso** / Mitad inferior: **Areno francoso**.

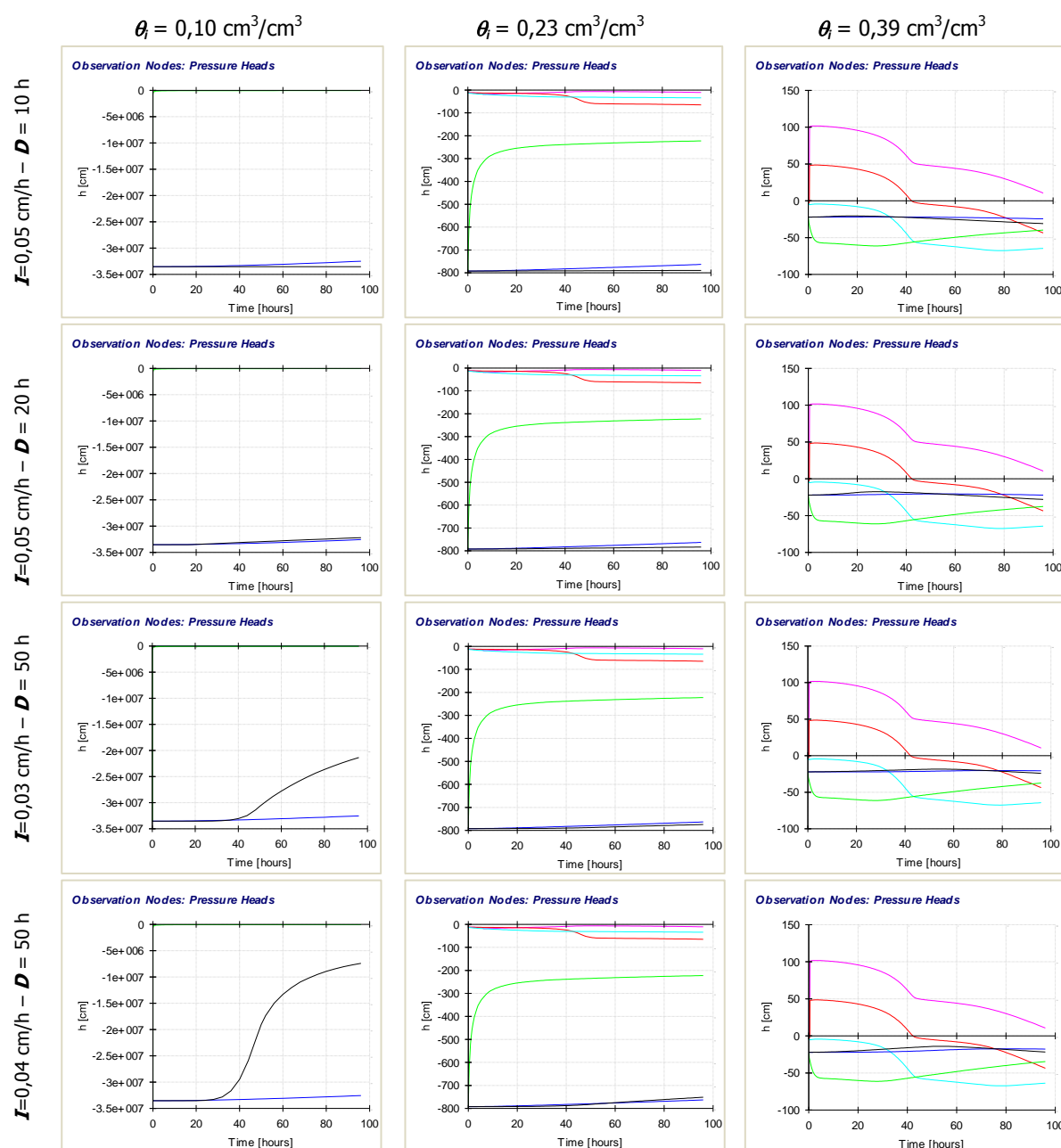


Figura AM 184. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones 14 a 17 de Intensidad – Duración según la Tabla 29, para un suelo de textura: Mitad superior: **Franco Arcilloso** / Mitad inferior: **Areno francoso**.

4. APÉNDICE NUMERAL 3.2.3.2 "Modelación en 2-D con umbrales de lluvia evento – lluvia acumulada"

Las siguientes figuras representan las cabezas de presión " ψ " alcanzadas para las dos combinaciones de lluvia evento – lluvia acumulada resaltadas de la Tabla 30, usando valores intermedios y cercanos a la saturación para θ_i , con las mismas combinaciones de suelos del numeral 3.2.3.2.

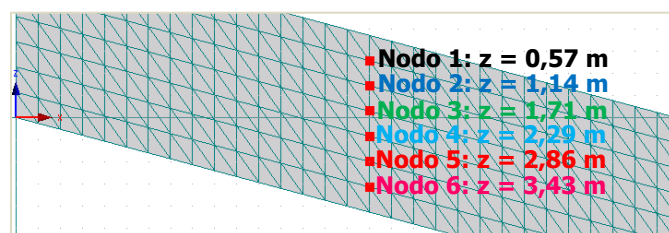


Figura AM 185. Ubicación de 6 nodos de control, centro del suelo, espesor: **4,0 m**. Suelo **Franco Limoso**.

Llac = 3,029 cm/d – 93 d. **Llev** = 0,01 cm/h – 8 h.

Llac = 0,925 cm/d – 40 d. **Llev** = 7,50 cm/h – 2 h.

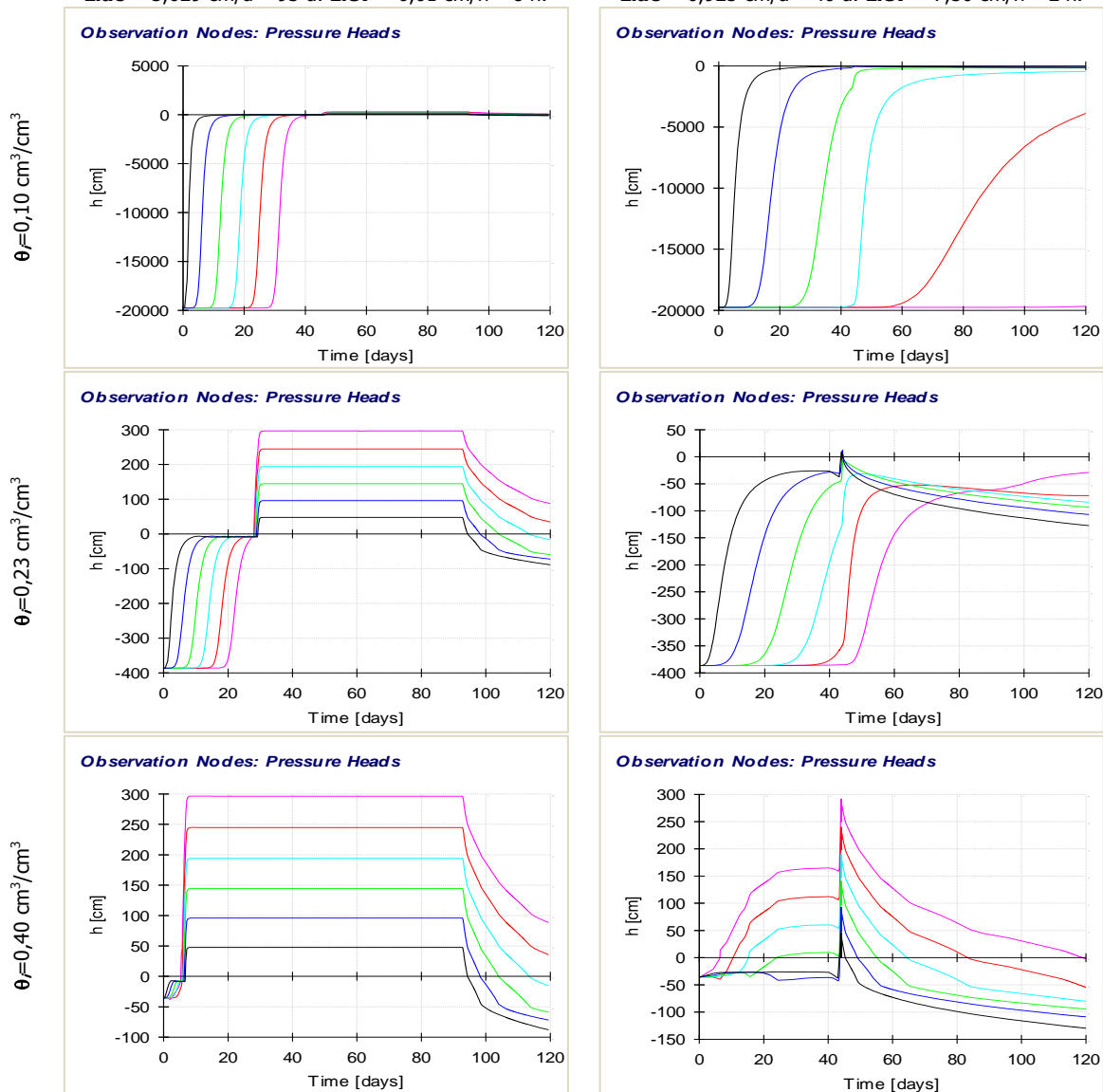


Figura AM 186. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones resaltadas de **Llac** – **Llev** de la Tabla 30, para un suelo de textura: **Franco Limoso**.

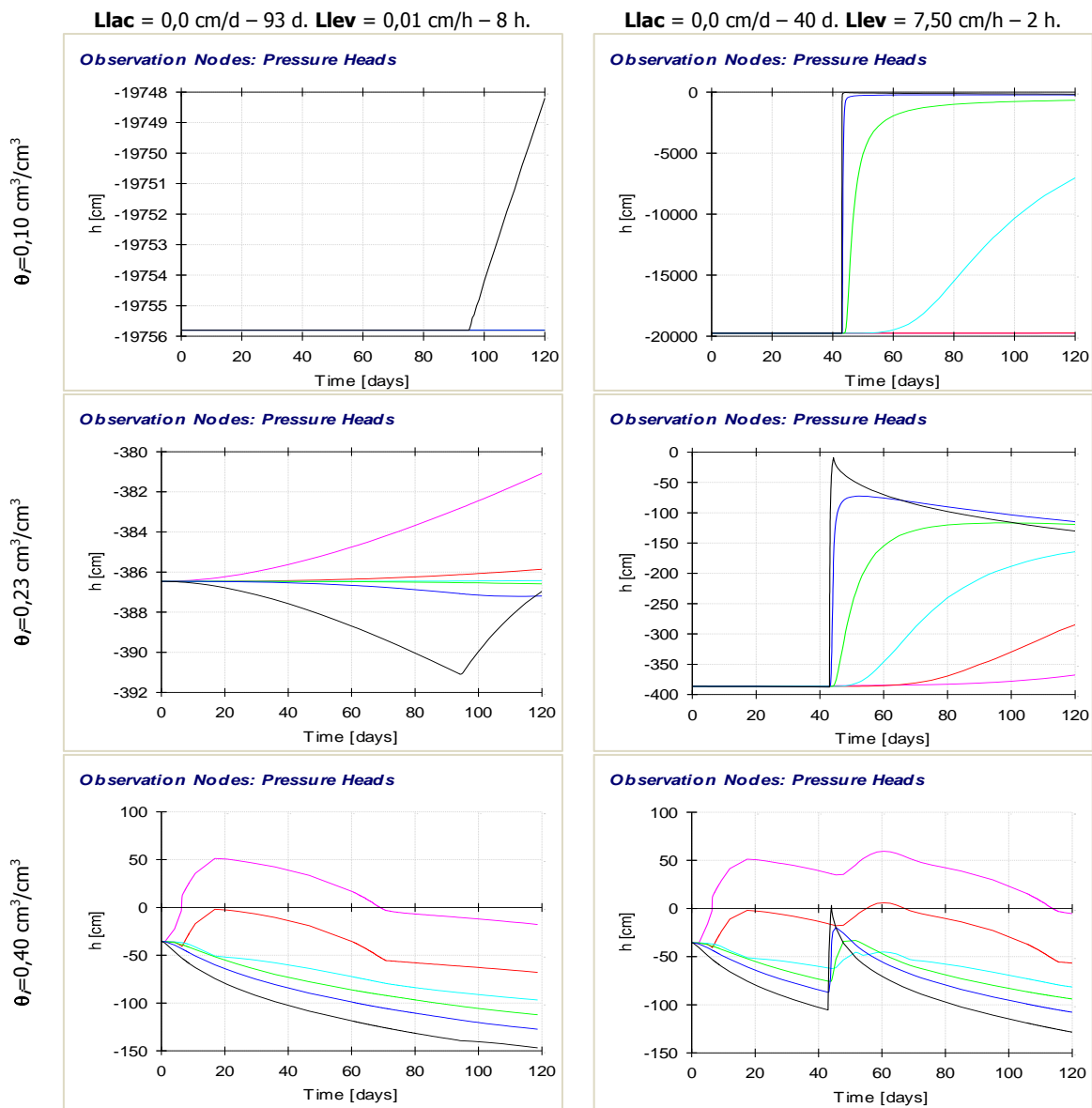


Figura AM 187. Valores de ψ alcanzados para L_{lev} sin L_{lac} , para un suelo de textura: **Franco Limoso**.

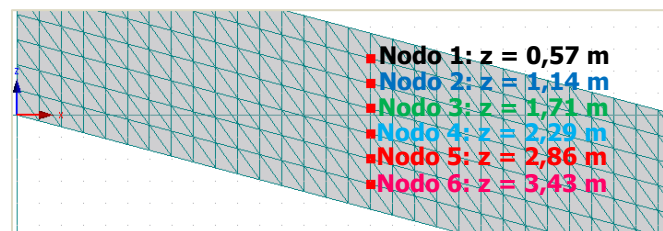


Figura AM 188. Ubicación de 6 nodos de control, centro del suelo, espesor: **4,0 m**. Suelo **Areno francoso**.

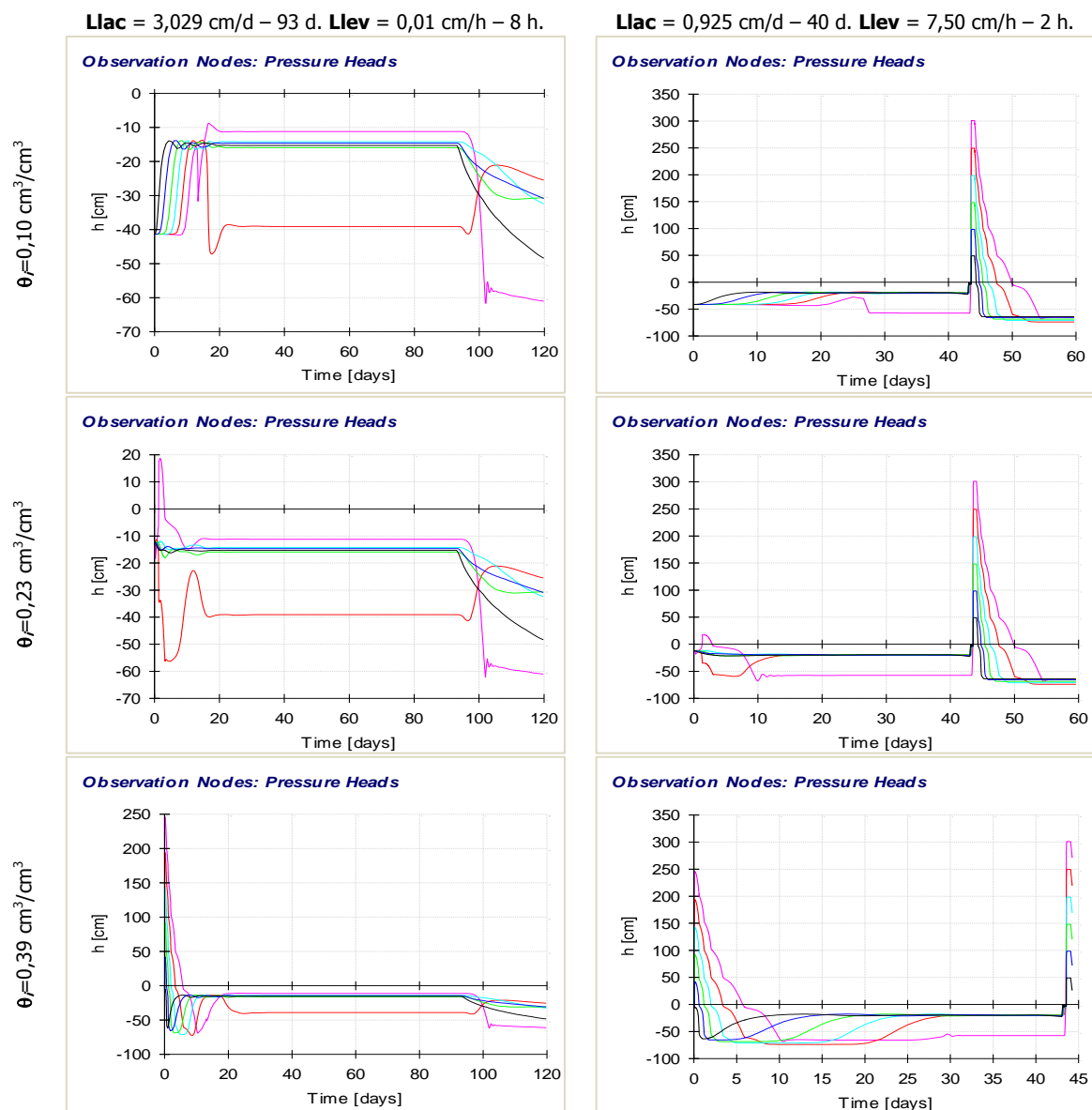


Figura AM 189. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones resaltadas de *Llac – Llev* de la Tabla 30, para un suelo de textura: **Areno francoso.**

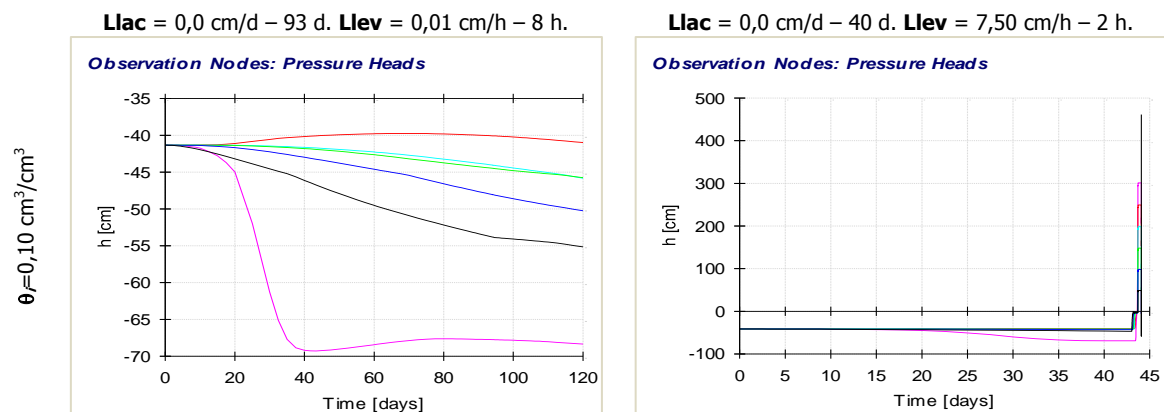


Figura AM 190. Valores de ψ alcanzados para *Llev* sin *Llac*, para un suelo de textura: **Areno francoso.**

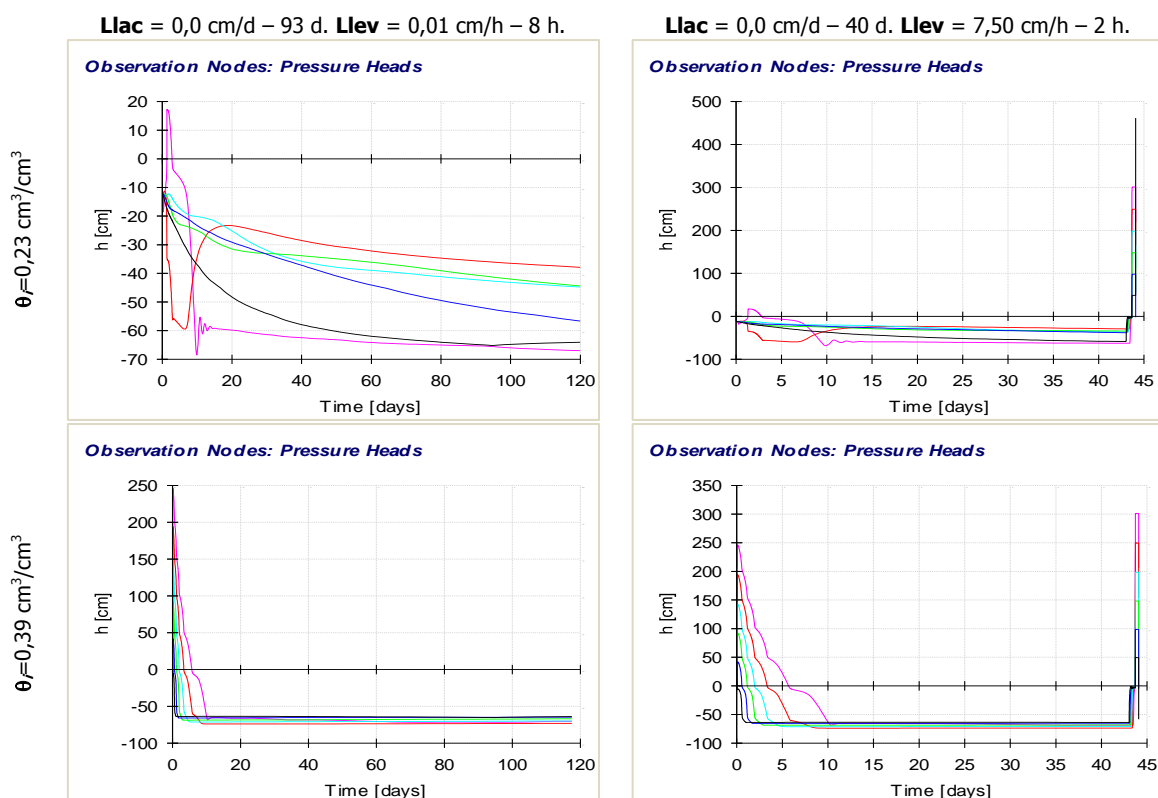


Figura AM 191. Valores de ψ alcanzados para *Llev* sin *Llac*, para un suelo de textura: **Areno francoso**.

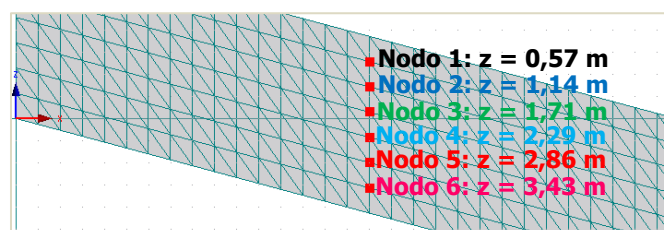


Figura AM 192. Ubicación de 6 nodos de control, centro del suelo, espesor: **4,0 m**. Suelo **Franco Arcilloso**.

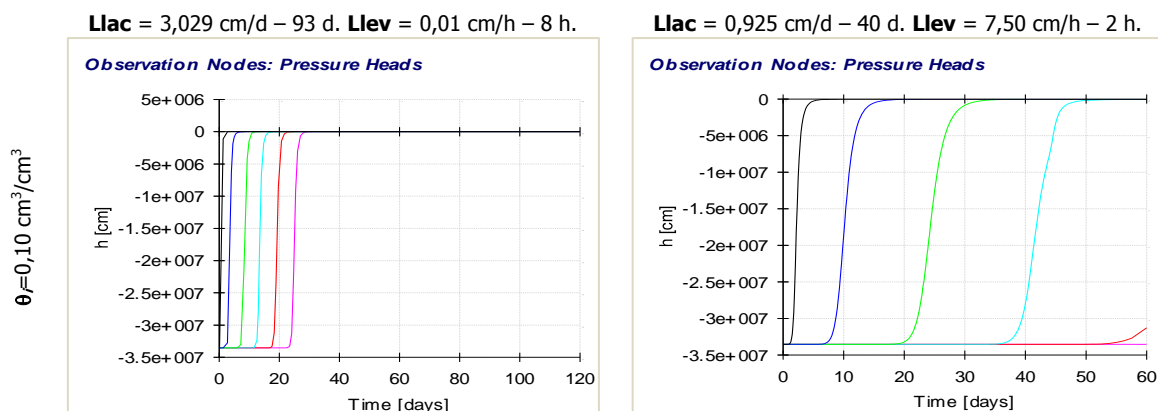


Figura AM 193. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones resaltadas de *Llac* – *Llev* de la Tabla 30, para un suelo de textura: **Franco Arcilloso**.

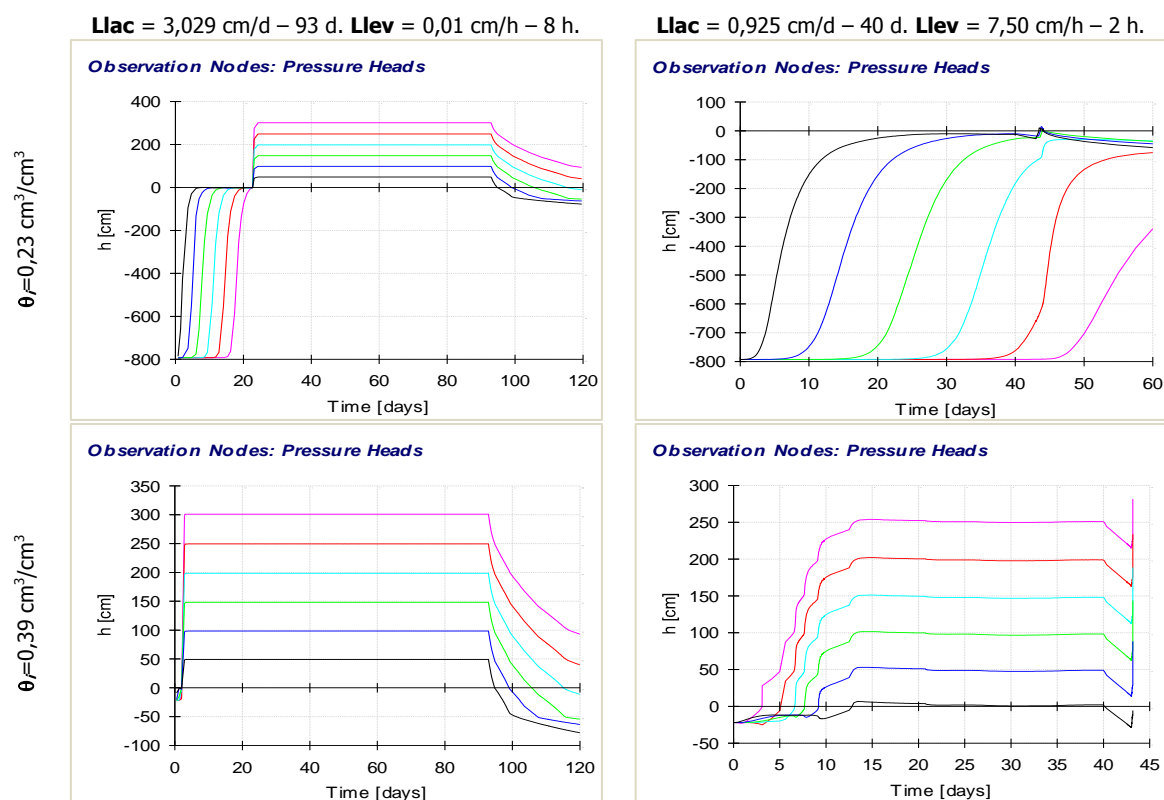


Figura AM 194. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones resaltadas de *Llac* – *Llev* de la Tabla 30, para un suelo de textura: **Franco Arcilloso**.

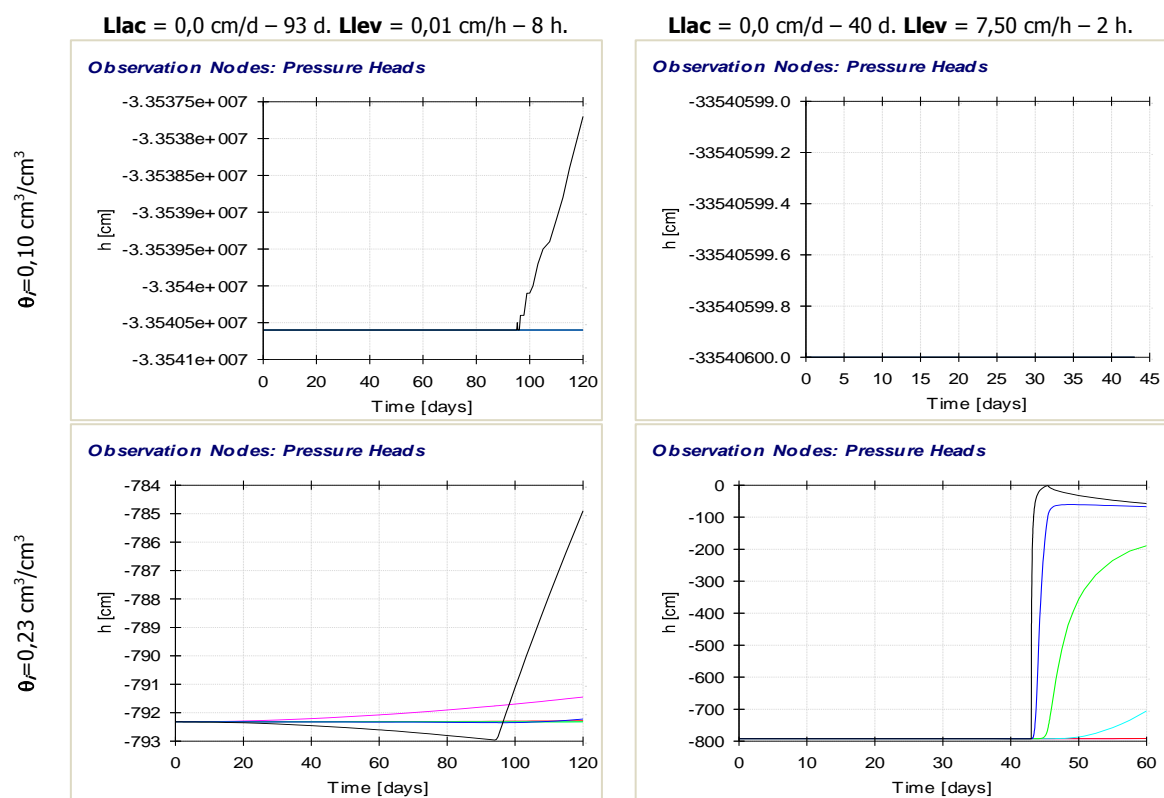


Figura AM 195. Valores de ψ alcanzados para *Llev* sin *Llac*, para un suelo de textura: **Franco Arcilloso**.

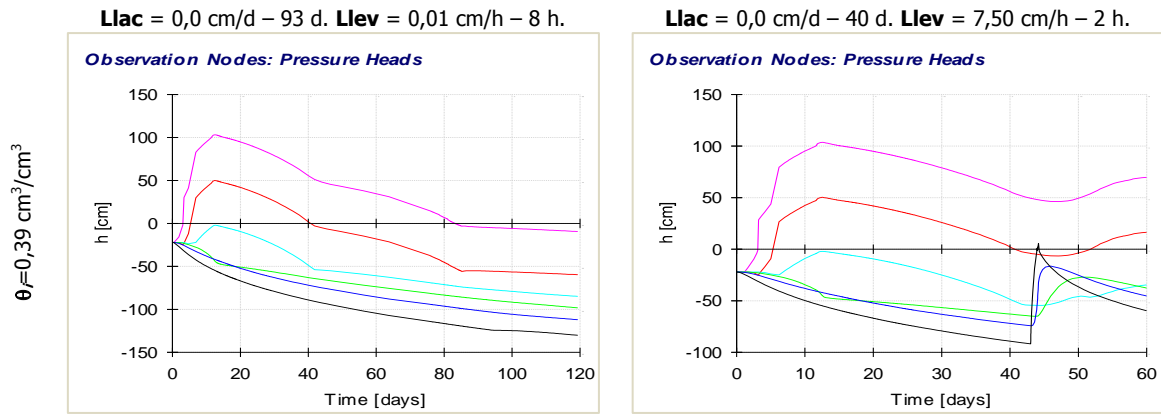


Figura AM 196. Valores de ψ alcanzados para $Llev$ sin $Llac$, para un suelo de textura: **Franco Arcilloso**.

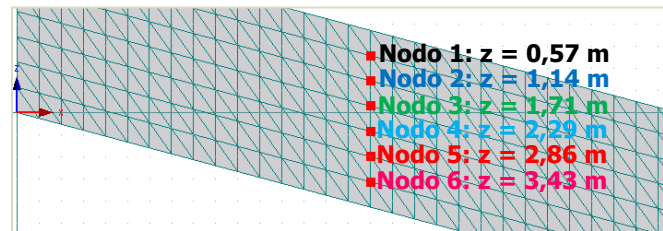


Figura AM 197. Ubicación de 6 nodos de control, centro del suelo, espesor: **4,0 m**. Mitad superior: **Areno francoso** / Mitad inferior: **Franco Arcilloso**.

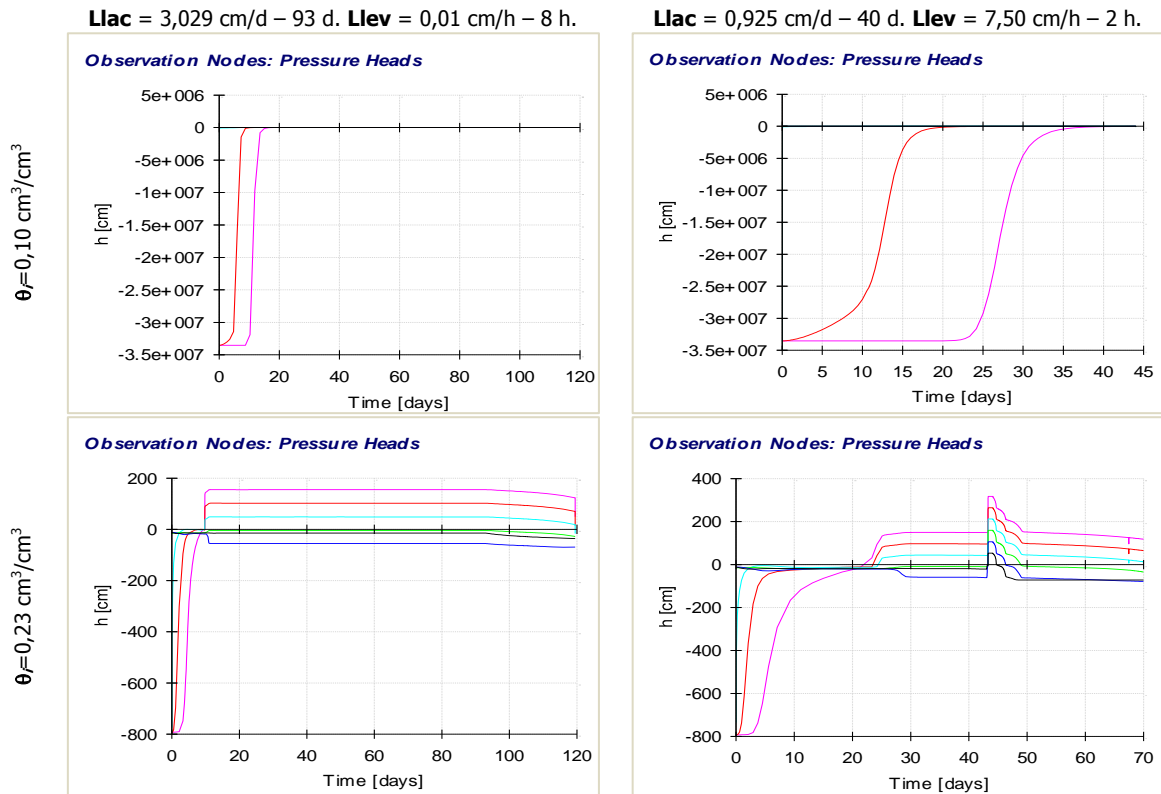


Figura AM 198. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones resaltadas de $Llac - Llev$ de la Tabla 30, para un suelo de textura: Mitad superior: **Areno francoso** / Mitad inferior: **Franco Arcilloso**.

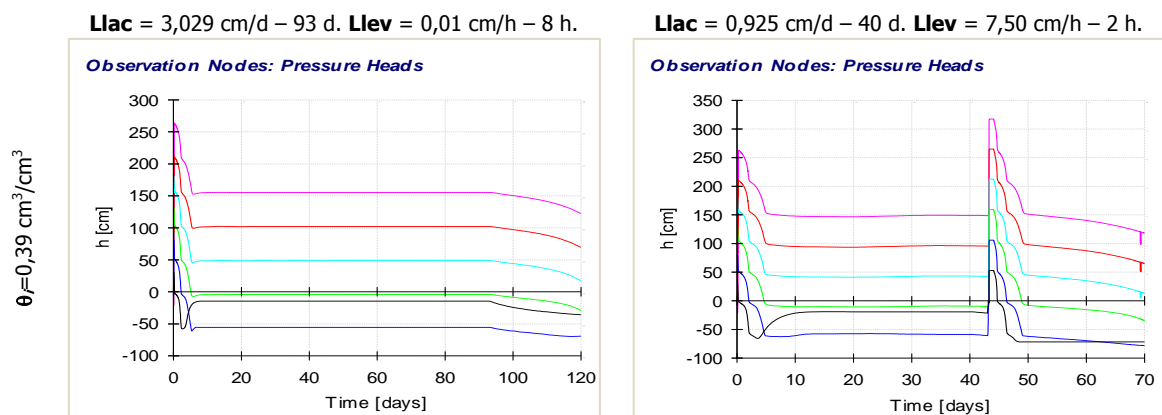


Figura AM 199. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones resaltadas de *Llac* – *Llev* de la Tabla 30, para un suelo de textura: Mitad superior: **Areno francoso** / Mitad inferior: **Franco Arcilloso**.

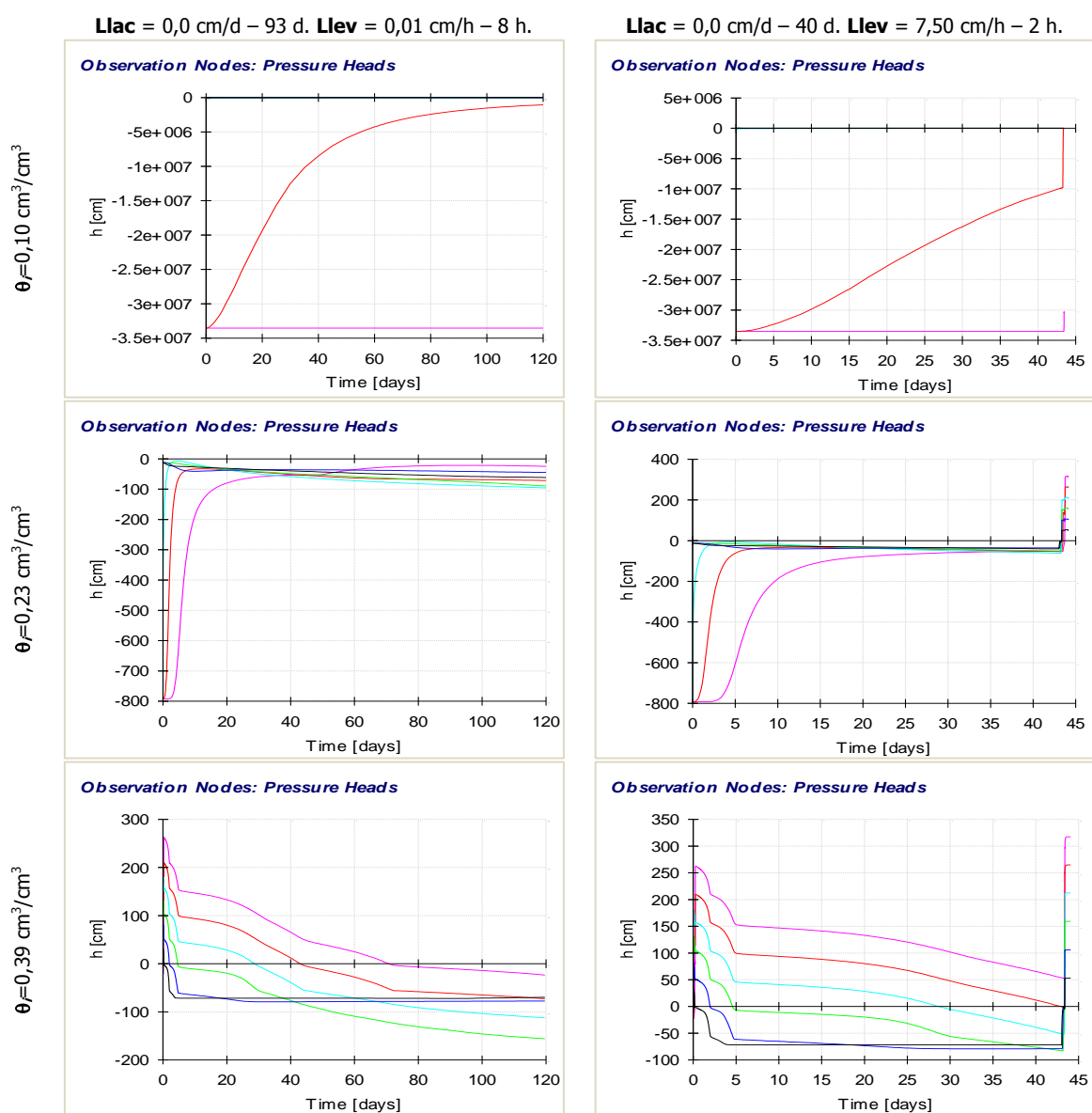


Figura AM 200. Valores de ψ alcanzados para *Llev* sin *Llac*, para un suelo de textura: Mitad superior: **Areno francoso** / Mitad inferior: **Franco Arcilloso**.

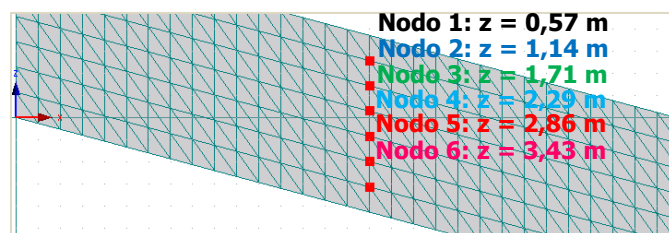


Figura AM 201. Ubicación de 6 nodos de control, centro del suelo, espesor: **4,0 m**. Mitad superior: **Franco Arcilloso** / Mitad inferior: **Areno francoso**.

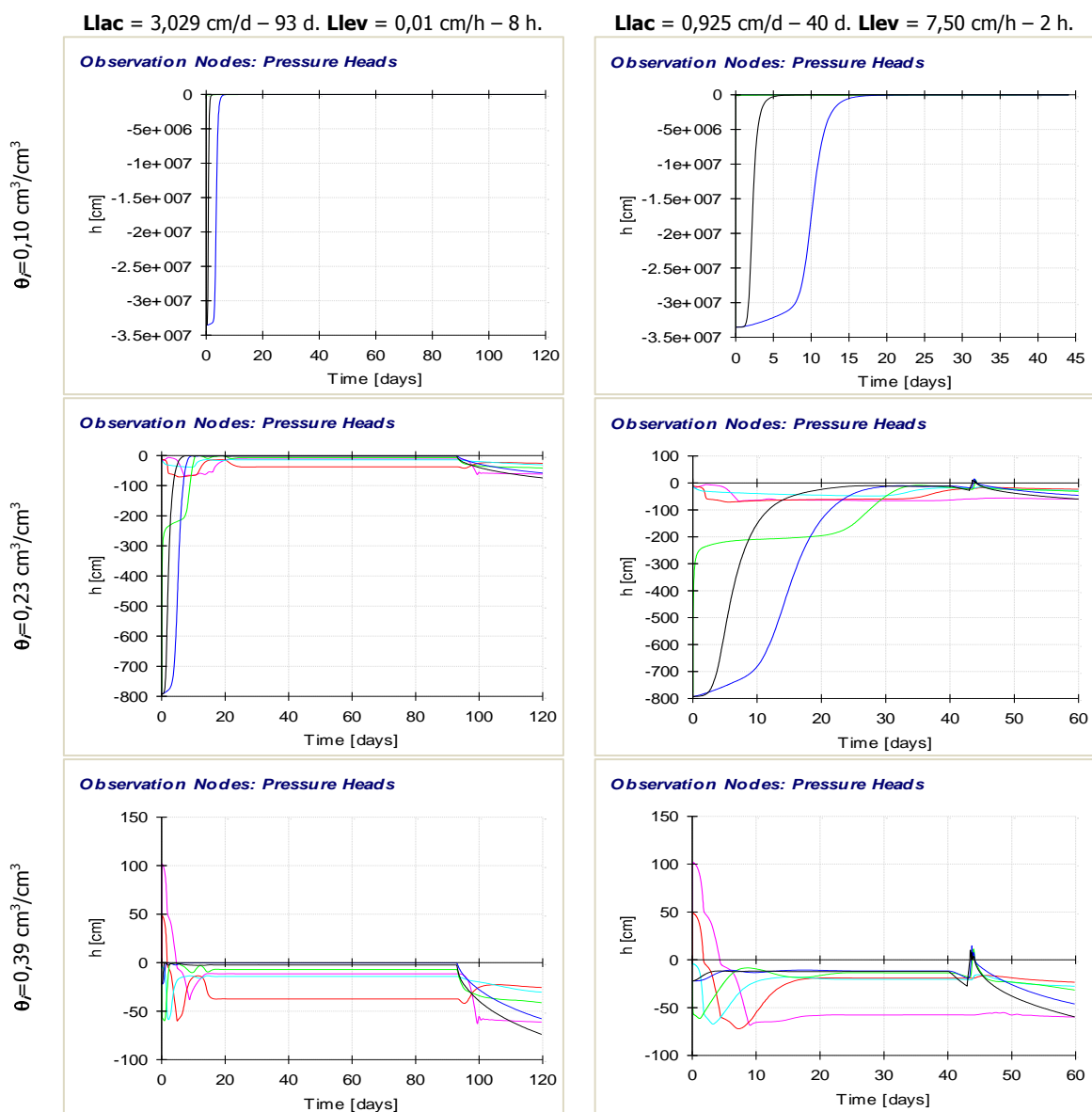


Figura AM 202. Valores de ψ alcanzados para las combinaciones resaltadas de L_{lac} – L_{lev} de la Tabla 30, para un suelo de textura: Mitad superior: **Franco Arcilloso** / Mitad inferior: **Areno francoso**.

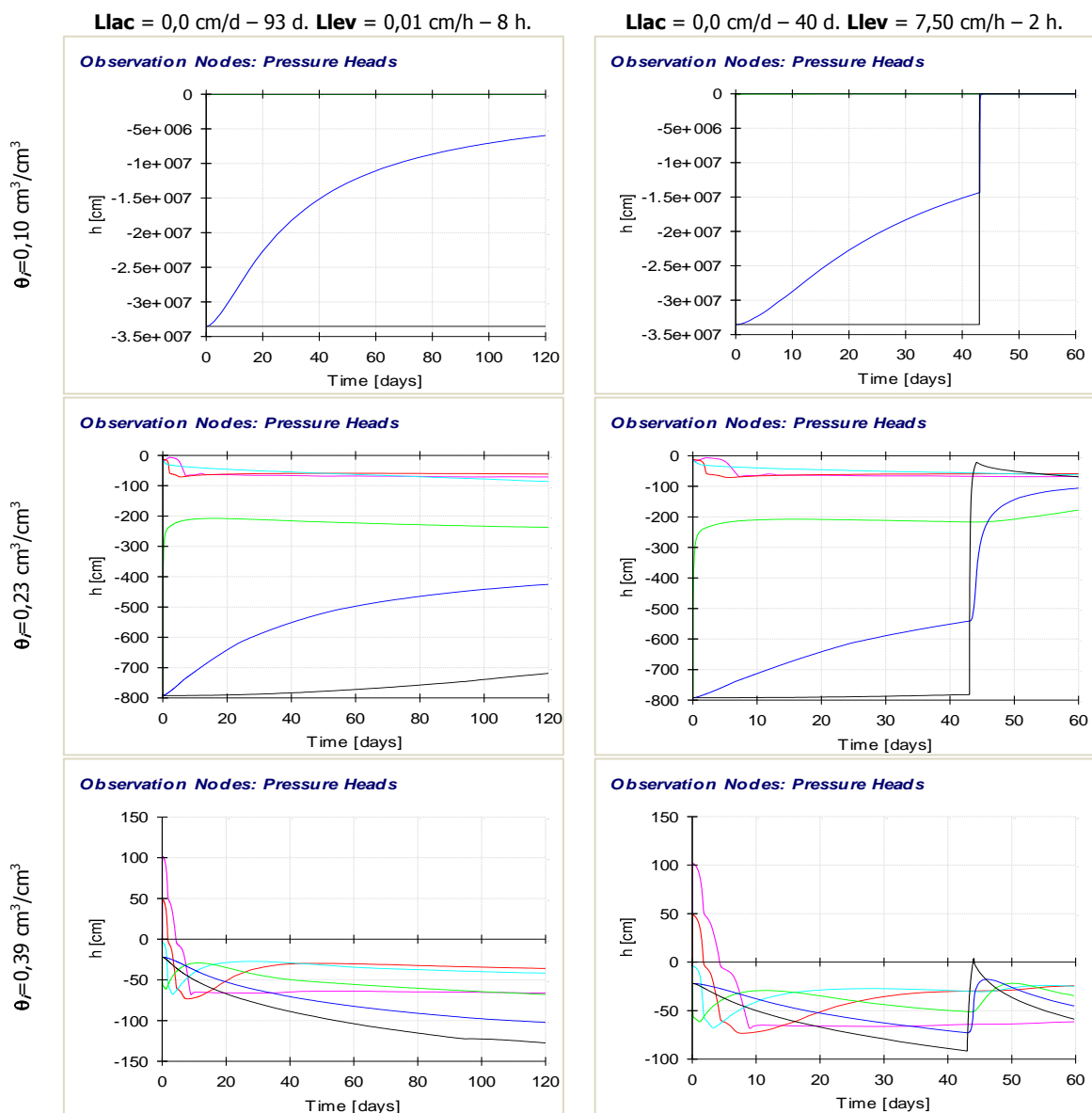


Figura AM 203. Valores de ψ alcanzados para *Llev* sin *Llac*, para un suelo de textura: Mitad superior: **Franco Arcilloso** / Mitad inferior: **Areno francoso**.